



FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA AMBIENTAL

TESIS

**“EVALUACIÓN ENERGÉTICO DE LA BIOMASA DE LOS
RESIDUOS FORESTALES, COMO ALTERNATIVA DE USO
DE ENERGÍA RENOVABLE EN LA CIUDAD DE
PUCALLPA – UCAYALI”**

PRESENTADO POR LA BACHILLER

HURTADO CASTRO, ROSARIO DEL CARMEN

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO AMBIENTAL

LIMA - PERÚ

2017

DEDICATORIA

Dedico mi Tesis a Dios por haberme permitido llegar hasta este punto y haberme dado salud para lograr mis objetivos, además de su infinita bondad y amor. A mis padres Gustavo e Ydalia y a mi hermana Alejandra por ser el pilar fundamental en todo lo que soy, en toda mi educación, tanto académica, como de la vida, por su incondicional apoyo perfectamente mantenido a través del tiempo.

Todo este trabajo ha sido posible gracias a ellos.

AGRADECIMIENTO

A mis padres por haberme forjado como la persona que soy en la actualidad; muchos de mis logros se los debo a ustedes entre los que se incluye este. Me formaron con reglas y con algunas libertades, pero al final de cuentas, me motivaron constantemente para alcanzar mis anhelos.

RESUMEN

La realización de la presente investigación plantea la evaluación y cuantificación de la biomasa como alternativa energética renovable en la ciudad de Pucallpa, para ello se describe el marco teórico que gobierna la biomasa en su conjunto, a efectos de clasificar los tipos de biomasa y su utilización como alternativa renovable o energías limpias.

Se han descrito los procesos más importantes en la actualidad para la producción de energía de la biomasa. Estos se agrupan en físicos, termoquímicos, bioquímicos (biológicos) y químicos, dependiendo de la naturaleza del agente que determina la conversión.

Los principales procesos físicos están relacionados con la producción de biocombustibles sólidos a partir de la biomasa. Los procesos termoquímicos están particularmente adaptados para la utilización de la biomasa lignocelulósica y son poco más difícilmente aplicables a biomasa líquidas o semilíquidas, mientras que los procesos bioquímicos, precisan de medios líquidos para su desarrollo, debido a los requerimientos vitales de los microorganismos que los producen.

De todos los procesos de conversión de la biomasa descritos, tan solo la combustión directa determina una oxidación completa de la biomasa, con liberación de energía en forma de calor. En el resto de los procesos se producen biocombustibles intermedios, entre los que cabe resaltar como más importantes el carbón vegetal y el gas de gasificación, obtenidos mediante pirolisis y gasificación, y el bioetanol y biodiesel, obtenidos mediante los procesos de fermentación alcohólica y transesterificación. Los dos primeros tienen aplicaciones fundamentalmente en la generación térmica y eléctrica y los dos segundos se emplean generalmente como biocombustibles en el sector transporte, solos o en mezclas con la gasolina y el gasóleo.

Bajo un punto de vista de eficiencia energética, los procesos termoquímicos presentan importantes ventajas frente a los bioquímicos y químicos, dado que los primeros actúan sobre la totalidad de la materia orgánica que compone la biomasa, mientras que el resto de procesos sólo actúa sobre determinadas

fracciones y con menos eficiencia de transformación que los termoquímicos. No obstante, el aprovechamiento energético en procesos de cogeneración, de los subproductos y residuos de los procesos bioquímicos y químicos contribuye a mejorar significativamente el balance energético y, por tanto, el rendimiento energético de los mismos.

Con respecto al desarrollo tecnológico de los procesos descritos, puede concluirse que la combustión directa, la digestión anaerobia, la fermentación alcohólica y los procesos químicos de transesterificación y producción de ETBE¹ han logrado un desarrollo satisfactorio en cuanto a eficiencia y emisiones de las tecnologías empleadas en cada caso. Sin embargo, es importante tener en cuenta que, excepto en aplicaciones térmicas, los desarrollados tecnológicamente hoy en día para la generación eléctrica (ciclos ranking) y la producción de Biocarburantes presentan importantes problemas de competitividad frente a las correspondientes tecnologías convencionales, lo que será preciso solventar en los próximos años mediante un desarrollo adicional adecuado de las tecnologías existentes y/o la puesta en el mercado de nuevas tecnologías más viables bajo un punto de vista económico y de eficiencia energética.

Generalmente la biomasa, constituida por residuos lignocelulósicos, originados en la industria maderera no es utilizada en forma apropiada. La acumulación de estos desechos en los que se encuentra el aserrín, ocupan un espacio físico importante dentro de los lugares de trabajo tornándose inclusive peligrosos. Entre los riesgos que provoca el aserrín se pueden mencionar: problemas de salud como asma, bronquitis crónica, problemas respiratorios causados por alergias, dermatitis, cánceres pulmonares, gastrointestinales y nasales. De allí la idea de aprovechar este residuo y obtener biogás a partir de él.

El inconveniente que presenta la utilización del aserrín, en un digestor anaeróbico, es la presencia de lignina, que es el principal componente de la madera. La lignina no es digerible por las bacterias.

Palabras Claves: Biomasa, digestor anaeróbico, metano.

¹ Etil Ter Butil Éter

ABSTRACT

The present research proposes the evaluation and quantification of biomass as a renewable energy alternative in the city of Pucallpa, to describe the theoretical framework that governs the biomass as a whole, in order to classify the types of biomass and their use As a renewable alternative or clean energies.

The most important processes for the energy production of biomass have been described. These are grouped into physical, thermochemical, biochemical (biological) and chemical, depending on the nature of the agent that determines the conversion.

The main physical processes are related to the production of solid biofuels from biomass. The thermochemical processes are particularly adapted for the use of lignocellulosic biomass and are little more difficult to apply to liquid or semi-liquid biomasses, whereas biochemical processes require liquid media for their development, due to the vital requirements of the microorganisms that produce them .

Of all the processes of conversion of the described biomass, only the direct combustion determines a complete oxidation of the biomass, with liberation of energy in the form of heat. In the rest of the processes, intermediate biofuels are produced, among which the most important are charcoal and gasification gas obtained by pyrolysis and gasification and bioethanol and biodiesel obtained by the processes of alcoholic fermentation and transesterification. The first two have applications primarily in thermal and electrical generation and the second two are generally used as biofuels in the transport sector, alone or in mixtures with gasoline and diesel.

In terms of energy efficiency, thermochemical processes have important advantages over biochemicals and chemicals, since the former act on all of the organic matter that makes up the biomass, while the other processes only act on certain fractions And with less processing efficiency than thermochemicals.

However, the energy utilization in cogeneration processes, the by-products and residues of the biochemical and chemical processes contributes to significantly improve the energy balance and, therefore, the energy efficiency of the same.

With regard to the technological development of the processes described, it can be concluded that direct combustion, anaerobic digestion, alcoholic fermentation and the chemical transesterification and production processes of ETBE have achieved a satisfactory development in terms of efficiency and emissions of the technologies used in each case. However, it is important to bear in mind that, except in thermal applications, those technologically developed today for electricity generation (cycles ranking) and the production of Biofuels present important problems of competitiveness against the corresponding conventional technologies, which will be precise In the years to come, by appropriate further development of existing technologies and / or the placing on the market of new, more economically viable and energy-efficient technologies.

Generally the biomass, constituted by lignocellulosic residues, originating in the timber industry is not used properly. The accumulation of these wastes in which the sawdust is, occupy an important physical space in the work places becoming even dangerous. Among the hazards of sawdust are health problems such as asthma, chronic bronchitis, respiratory problems caused by allergies, dermatitis, lung, gastrointestinal and nasal cancers. Hence the idea of taking advantage of this waste and obtaining biogas from it.

The disadvantage of the use of sawdust in an anaerobic digester is the presence of lignin, which is the main component of wood. Lignin is not digestible by bacteria.

Keywords: Biomass, anaerobic digester, methane.

INTRODUCCIÓN

La ciencia y la técnica alcanzan una dimensión social muy grande cuando acometen tareas que urgen a la sociedad y cuando aportan soluciones que pueden tener carácter nacional o territorial. En la ciudad de Pucallpa, Ucayali, se encuentran las mayores reservas de bosques del país, alrededor del 30% del total nacional (Díaz, 1986) y sobre esta base se desarrolla lo que se denomina la industria primaria de elaboración de la madera, cuyo renglón económico lo constituye la madera aserrada. Esta industria genera dos subproductos o residuos que son el aserrín y la corteza. Los volúmenes anuales que se acumulan de aserrín en nuestra provincia alcanzan entre 5000 y 7000 m³ y hasta el momento no se ha hecho un uso racional de esta biomasa, la cual al no ser evacuada con prontitud en pocos días pueden estrangular la producción y por otro lado su acumulación provoca efectos ambientales negativos. Teniendo en cuenta que tanto el aserrín como la corteza constituyen fuente de materia prima para la obtención de valiosos productos para el hombre y que en Pucallpa no existe una industria química forestal que sí existe en otras regiones del mundo, entendemos que proponer las vías para dar utilización a un material residual es un problema que atañe a la ciencia, en particular a la química y que reportaría beneficios de carácter social y ambiental con vistas a la alimentación animal y al desarrollo de la agricultura en la provincia.

La biomasa constituye en la actualidad una de las energías más utilizadas en el mundo y es la fuente de energía renovable en la que descansan las mayores expectativas de desarrollo de este tipo de energías en las próximas décadas.

La biomasa tiene actualmente dos campos principales de aplicación energética: como biocombustible sólido o gaseoso, para la producción térmica y eléctrica y como biocombustible líquido en el sector transporte. En este trabajo, se describen el concepto de biomasa como recurso energético, su potencial y su utilización actual y se describen los materiales que entran a formar parte del recurso estudiado.

Posteriormente se describen los procesos y tecnologías de conversión energética de la biomasa y se analiza el estado actual de desarrollo de las aplicaciones energéticas de la biomasa.

El objetivo final es ofrecer una visión lo más amplia y detallada posible del estado actual y las posibilidades que ofrece el recurso de la biomasa para producir energía térmica y eléctrica.

Asimismo, las proyecciones del uso de la energía global se basan en escenarios que son contruidos alrededor de suposiciones acerca de cuán lejos la economía se expandirá, cuán rápido crecerá la población mundial, el grado de avance tecnológico, medidas de conservación, la adopción de tecnologías energéticamente eficientes, la disponibilidad relativa y precio de los combustibles fósiles. Estos escenarios sugieren que en el año 2010, los combustibles fósiles probablemente absorberán las $\frac{3}{4}$ de la energía comercial del mundo y el uso de energías renovables jugará un pequeño rol, pero en ascenso, en los próximos 30 años. Las energías renovables tales como la eólica, la solar en sus diferentes formas, contribuyen con una cifra inferior al 2% en la provisión global de la energía.

El uso de la biomasa aporta beneficios que son no sólo energéticos, sino que su transformación se convierte en beneficiosa y necesaria para el entorno. Es un sistema idóneo de eliminación de residuos, con la subsiguiente mejora del ambiente rural, urbano e industrial.

Los materiales lignocelulósicos constituyen una fuente de materia prima importante para la obtención de productos de amplia utilización en la agricultura. Dentro de estos materiales se encuentran el aserrín y la corteza que resultan desechos de la industria de la elaboración primaria de la madera.

En el mundo se desarrollan cada día nuevas tecnologías para dar un uso racional a estos residuos, que además contribuyen con su acumulación a la contaminación del entorno. En el presente trabajo de investigación se propone el mejor aprovechamiento óptimo de los residuos con enfoque ambientalista. A continuación se resume el desarrollo del contexto del presente trabajo:

En el Capítulo I: **Planteamiento del Problema**, se exponen la realidad de problemática de los residuos forestales proveniente de la industria de madreara; así como, los antecedentes de investigaciones relacionados a la biomasa del aserrín, la formulación del problema, la formulación de los objetivos, la justificación e importancia y la descripción de las limitaciones del presente de trabajo de investigación.

En el Capítulo II: **Fundamentos Teóricos de la Investigación**, se describe el marco referencial, el marco legal, el marco conceptual y marco teórico utilizado para el desarrollo de la investigación, se hace mención de antecedentes teóricos vinculados al tema que se viene tratando; así como, una explicación del panorama de la biomasa como recurso energético; procesos y tecnologías de conversión energética; situación actual de las aplicaciones energéticas de la biomasa.

En el Capítulo III: se presenta el **Planteamiento Metodológico** en que se sustenta la investigación, asimismo, se desarrolla la metodología y técnicas utilizadas, etapa de aplicación del instrumento de medida, desde la decisión de formular en la Empresa, la selección de los componentes que lo constituyen el modelo de control de gestión hasta la aprobación de la propuesta recibida.

En el Capítulo IV: **Presentación y Análisis de los Resultados**, en este capítulo se presenta el desarrollo metodológico de la evaluación del potencial energético que conlleva a determinar la cuantificación de la cantidad de energía que se puede producir con la biomasa de los residuos forestales provenientes de la actividad de la industria maderera.

Finalmente el Capítulo VIII: se presentan un set de **Conclusiones y Recomendaciones** como resultado de la evaluación energético de la biomasa de los residuos forestales, como alternativa de uso de energía renovable en la ciudad de Pucallpa – Ucayali.

ÍNDICE

| | |
|----------------|-----|
| DEDICATORIA | i |
| AGRADECIMIENTO | ii |
| RESUMEN | iii |
| ABSTRACT | v |
| INTRODUCCIÓN | vii |

CAPÍTULO I

PLANEAMIENTO DEL PROBLEMA

| | | |
|------|---|----|
| 1.1. | Descripción de la realidad problemática | 01 |
| | 1.1.1. Características del Problema | 01 |
| | 1.1.2. Definición del Problema | 02 |
| 1.2. | Formulación del problema | 04 |
| | 1.2.1. Problema general | 04 |
| | 1.2.2. Problemas específicos | 04 |
| 1.3. | Objetivo de la investigación | 04 |
| | 1.3.1. Objetivo general | 04 |
| | 1.3.2. Objetivos específicos | 05 |
| 1.4. | Justificación de la investigación | 05 |
| | 1.4.1. Justificación Teórica | 07 |
| | 1.4.2. Justificación Práctica | 07 |
| | 1.4.3. Justificación Metodológica | 07 |
| 1.5. | Importancia de la investigación | 07 |
| 1.6. | Limitaciones de la Investigación | 08 |

CAPÍTULO II

FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE LA INVESTIGACIÓN

| | | |
|------|---|----|
| 2.1. | Marco Referencial | 10 |
| | 2.1.1. Antecedentes de la Investigación | 10 |
| | 2.1.2. Referencias Históricas | 12 |

| | | |
|--------|---|----|
| 2.2. | Marco Legal | 16 |
| 2.3. | Marco Conceptual | 17 |
| 2.4. | Marco Teórico | 21 |
| 2.4.1. | Panorama de la Biomasa como Recurso Energético. | 21 |
| 2.4.2. | La Biomasa como Recurso Energético | 29 |
| 2.4.3. | Procesos y Tecnologías de conversión energética | 43 |

CAPÍTULO III

PLANTEAMIENTO METODOLÓGICO

| | | |
|--------|--|-----|
| 3.1. | Tipo y Nivel de la Investigación | 101 |
| 3.1.1. | Tipo de la Investigación | 101 |
| 3.1.2. | Nivel de la Investigación | 102 |
| 3.2. | Método de la Investigación | 102 |
| 3.3. | Hipótesis de la Investigación | 103 |
| 3.3.1. | Hipótesis General | 103 |
| 3.3.2. | Hipótesis Específicas | 103 |
| 3.4. | Variable de la Investigación | 104 |
| 3.4.1. | Variable Independiente | 104 |
| 3.4.2. | Variable Dependiente | 104 |
| 3.5. | Cobertura del Estudio de Investigación | 104 |
| 3.5.1. | Universo | 104 |
| 3.5.2. | Población | 105 |
| 3.5.3. | Muestra | 105 |
| 3.6. | Técnicas, Instrumentos y Fuentes de Recolección de Datos | 105 |
| 3.6.1. | Técnicas de la Investigación | 105 |
| 3.6.2. | Instrumentos de la Investigación | 106 |
| 3.7. | Técnicas de Análisis de la Información | 106 |
| 3.8. | Técnicas de Procesamientos de Datos | 106 |
| 3.9. | Análisis e Interpretación de Resultados | 107 |

CAPÍTULO IV
ORGANIZACIÓN, PRESENTACION Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

| | | |
|------------------------------------|----------------------------|-----|
| 4.1. | Presentación de Resultados | 108 |
| 4.1.1. | Resultados Parciales | 109 |
| 4.1.2. | Resultados Generales | 111 |
| 4.2. | Contrastación de Hipótesis | 111 |
| 4.3. | Discusión de Resultados | 112 |
| CONCLUSIONES | | 113 |
| RECOMENDACIONES | | 114 |
| REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS | | 115 |
| ANEXO | | 117 |
| Anexo N° 1: Matriz de Consistencia | | 118 |

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. DESCRIPCIÓN DE LA REALIDAD PROBLEMÁTICA

1.1.1. Características del Problema

Un obstáculo para la sustentabilidad de los bosques y las industrias forestales es el grado de desechos producidos tanto en los bosques como en las plantas procesadoras de aserrío. La comunidad científica internacional reconoce que la situación de los residuos es un problema global que requiere atención urgente.

Conferencias recientes como la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente (Rio de Janeiro, 1992); la Conferencia Global sobre Desarrollo Sostenible de los Pequeño Estados Insulares en Desarrollo (Barbados, 1994) y la Conferencia Mundial sobre Reducción de Desastres (Yokohama, 1994), han planteado la necesidad de crear mejores estrategias para reducir el volumen de los residuos.

En el departamento de Ucayali se encuentran las mayores reservas forestales del Perú. La superficie cubierta de bosque alcanza el 75%, correspondiendo el primer lugar a la Provincia de Coronel Portillo, las cuales representan el 30% del total de la superficie boscosa. El interés industrial fundamental de estos bosques de la provincia Coronel Portillo (Pucallpa) es obtener madera aserrada, que es el rubro económico principal. El uso de la madera tiene tendencia a incrementar en los próximos años con la ejecución del Programa de Desarrollo Económico Forestal de la Región Ucayali, donde se prevé la explotación de muchas especies para la elaboración de tableros, parquets, madera aserrada, madera para astillas, entre otros.

Figura N° 1: Actividad maderera y sus residuos en las orillas de la quebrada de Yumantay – Distrito de Manantay – Pucallpa – Ucayali



1.1.2. Definición del Problema

La industria de transformación de la madera genera altos volúmenes de residuos y su acumulación provoca efectos ambientales negativos como la emisión a la atmosfera del dióxido de carbono, contenido en la materia orgánica. Además, dichos residuos se pueden convertir en un medio ideal para la generación de plagas y enfermedades, entre otros.

Figura N° 2: Niños bañándose en la rívera de los cerros de residuos de aserrín.



Figura N° 3: Pobladores que viven cercanas a los cerros de residuos de aserrín.



Por otro lado, la biomasa forestal que se origina en el proceso de aserrío sobre todo aserrín, es un material lignocelulósico que por su naturaleza química (entre 60-70% de polisacáridos) puede compararse con la del bagazo de caña y otros derivados que en Perú ya se utilizan industrialmente, aportando a la sociedad diversos

productos. El presente estudio tiene como objetivo determinar la potencialidad de la biomasa del aserrín como alternativa energética renovable, como parte de la clasificación de la Biomasa Forestal, principal residuo de la industria de elaboración de la madera, como materia prima para diversos fines productivos.

1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

1.2.1. Problema General

¿Se podría determinar el potencial energético producido de la biomasa de los residuos forestales, como alternativa de uso de energía renovable en la ciudad Pucallpa – Ucayali?

1.2.2. Problemas Específico

- ¿Es factible calcular las masas de residuos de biomasa del aserrín que se produce por la industria maderera?
- ¿Es posible determinar la cantidad de energía producida de los residuos de la biomasa de aserrín por la industria maderera?
- ¿Es factible calcular la cantidad de emisión que se produce de CH₄ por los residuos de la biomasa de aserrín por la industria maderera?
- ¿Se podría describir los beneficios del uso de la biomasa de los residuos de biomasa del aserrín por la industria maderera?

1.3. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.3.1. Objetivo General

Determinar el potencial energético producido de la biomasa de los residuos forestales, como alternativa de uso de energía renovable en la ciudad de Pucallpa - Ucayali.

1.3.2. Objetivos Específico

- Calcular la masa de residuos de biomasa del aserrín que se produce por la industria maderera.
- Determinar la cantidad de energía producida de los residuos de la biomasa de aserrín por la industria maderera
- Calcular la cantidad de emisión que se produce de CH₄ por los residuos de la biomasa de aserrín por la industria maderera
- Describir los beneficios del uso de la biomasa de los residuos de biomasa del aserrín por la industria maderera

1.4. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

La industria maderera arroja miles de toneladas diarias de biomasa del aserrín, las mismas que no se aprovechan adecuadamente los residuos lignocelulósicos que se originan en las principales industrias forestales, los que provocan, además, la contaminación del entorno. Los residuos industriales están asociados a los residuos de materiales que se forman en el proceso de producción del producto principal y que han perdido completa o parcialmente su valor de uso. El uso de la madera por el hombre data desde su propio surgimiento. Estos usos van desde combustible hasta material para construcción de utensilios, muebles, puentes, viviendas, etc.

Se conoce que antes de nuestra era muchas sustancias derivadas de la pirólisis de la madera fueron utilizadas para conservar a los Faraones. Tiempos atrás las resinas y el pez de madera y corteza se usaban como preservativo de la madera, como cola y masilla. Los Incas efectuaban operaciones complicadas como cesáreas y trepanaciones con el uso de desinfectantes obtenidos a partir de la madera.

Existe una serie de productos considerados como productos menores del bosque que tienen gran significado en la economía de los países tropicales en particular y de los cuales no hay estadísticas de producción, consumo

interno y comercio internacional. Se consideran de tremenda importancia los exudados arbóreos, o sea, gomas, resinas, látex, tintes, sustancias medicinales, taninos, etc. (Díaz, 1986). La experiencia acumulada por el hombre en este sentido lo hizo introducirse en la búsqueda del porqué de estos efectos, y como resultado de la ciencia y la técnica ya existen en el mundo las industrias químicas de la madera, entre las más importantes, la de celulosa y papel y la industria hidrolítica.

Para la utilización racional de los residuos forestales, el método más perspectivo es el tratamiento químico, que conjugado con tratamientos biotecnológicos, permite obtener alimentos, sustancias biológicamente activas, monómeros, resinas sintéticas, combustible y diferentes productos para usos técnicos. De los tres componentes principales de los tejidos vegetales la mayor atención de los investigadores hasta ahora se le ha dedicado a la celulosa, la cual debido a su naturaleza fibrosa ha obtenido gran aplicación en la industria del papel, artículos textiles y placas. Las hemicelulosas encuentran utilización para la obtención de etanol, levaduras forrajeras y furfural en las industrias hidrolíticas (Charkov, 1972). Los extraordinarios adelantos hechos en los últimos tiempos en el campo de la ciencia y la tecnología representan un reto particularmente difícil para los países en desarrollo como el nuestro. Tales avances brindan nuevas oportunidades, pero para aprovecharlas, el país debe aumentar rápidamente su capacidad para aplicar las nuevas tecnologías. Aunque esta tarea es difícil, al mismo tiempo es indispensable. Tenemos que adecuar las nuevas tecnologías a las condiciones socioculturales y ambientales existentes (Comisión del Sur, 1991).

En el caso que nos ocupa, la ciencia puede acumular un gran volumen de conocimiento teórico y en un futuro nuestra provincia quizás disponga de una industria químico – forestal; sin embargo, nosotros nos proponemos contribuir al desarrollo del territorio obteniendo bienes para la sociedad con el mínimo de recursos, en instalaciones sencillas, un desarrollo centrado en la gente, propiciando que este desarrollo sea un proceso de crecimiento

basado en los propios medios y conseguido mediante la participación del pueblo en función de sus intereses, producir para satisfacer las necesidades de la población y a la vez proporcionar empleos productivos.

1.4.1. Justificación Teórica

El estudio de investigación tiene como propósito de generar reflexión de una realidad que no se está aprovechando la biomasa de los residuos forestales provenientes de la actividad maderera; asimismo, contrastar los resultados del conocimiento existente sobre la biomasa forestal como alternativa de energía renovable, investigación que tiene justificación teórica en la determinación del potencial energético de la biomasa a partir del poder calorífico.

1.4.2. Justificación Práctica

El estudio de investigación tiene justificación práctica, porque pretende dar solución al problema de los residuos forestales de la actividad maderera, con la alternativa de uso energético en la ciudad de Pucallpa y reducción de la emisión en forma natural del CH₄

1.4.3. Justificación Metodológica

El estudio de investigación, no tiene justificación metodológica porque no propone un nuevo método para generar conocimiento válido y confiable. Todo lo contrario aplica los conocimientos existentes.

1.5. IMPORTANCIA DE LA INVESTIGACIÓN

El presente trabajo de investigación es importante ya que contribuye a la solución de la contaminación de aguas impactadas por los residuos del aserrío de la madera; asimismo, la contaminación del aire, escenario que es muy frecuente en nuestro medio como es la ciudad de Pucallpa, debido a

que la principal actividad productiva de la ciudad es la madera, lo cual está demostrado que representa considerables impactos ambientales en las fuentes de agua y agua, a ello se suma que nuestro país cuenta con la normatividad para proteger la calidad de las aguas y aire; cabe indicar que la industria maderera en muchos de los casos es una actividad informal la cual por no poseer la tecnología necesaria es altamente contaminante, y este estudio pretende dar solución a los residuos de la industria maderera con el fin de contribuir a la reducción y mitigación de los gases GEI.

En la actualidad existen tecnologías limpias para la reducción de contaminación al agua y aire, tales como la aplicación de los procesos de gasificación para obtener CH_4 para ser quemado en motores de combustión interna y producir electricidad o calor para producir vapor para la industria que lo necesita.

El aprovechamiento de la biomasa del aserrín se torna importante porque implica maximizar la materia prima en las industrias madereras e incrementar la eficiencia de los sistemas; así como, genera un valor agregado a la actividad utilizando los residuos de la biomasa del aserrín, que implica incrementa la rentabilidad de las empresas y sobre todo contribuye a la reducción de la contaminación del agua y aire.

1.6. LIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN

Entre las principales limitaciones para el desarrollo del presente trabajo de investigación, se puede resaltar las siguientes:

- **Limitaciones Tecnológicas:**

Las limitaciones tecnológicas de este trabajo de investigación son referentes a los escasos recursos informativos referentes al tema de estudio; asimismo, se presentan limitaciones en cuanto a la disponibilidad de instrumentos, laboratorios, e infraestructura adecuada para la realización de las muestras.

- **Limitación Espacial:**

Para el presente estudio de investigación se identificarán empresas industriales, con la finalidad de conocer los tipos de especies forestales trabajan y conocer la productividad de la empresa en lo referente al aserrío de la materia prima madera.

- **Limitación Temporal:**

Si existe limitación temporal, ya que existe temporadas de no aserrío de la madera, por temporadas de estiaje o época de verano.

CAPÍTULO II

FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE LA INVESTIGACIÓN

2.1. MARCO REFERENCIAL

2.1.1. Antecedentes de la Investigación

En un futuro no lejano, nos espera el paso de la producción petroquímica a la elaboración química y bioquímica de la madera y otros materiales vegetales. Por otro lado, entre los problemas más acuciantes que enfrenta la humanidad en el momento actual, ocupan un lugar prominente la explosión demográfica, con su incidencia cada vez mayor en la producción alimentaria y la crisis energética mundial, con la perspectiva sombría del agotamiento, no lejana del combustible fósil. La biomasa forestal que se origina en el proceso de aserrado de la madera (fundamentalmente aserrín y corteza), constituye un material lignocelulósico que por su naturaleza química puede compararse con la del bagazo de caña y otros derivados de ésta, cuya utilización en nuestro país ya constituye una industria. Por cuanto un obstáculo para la sustentabilidad de los bosques y las industrias forestales lo constituye el nivel de desechos en el bosque mismo como en las plantas procesadoras de madera, en 1990, bajo la dirección de la Organización Internacional de las Maderas Tropicales, se estableció un proyecto para evaluar el nivel de desechos y recomendar formas de reducirlos (Noack, 1995).

Procesos especiales para el uso de biomasa: Existen procesos termoquímicos que mediante reacciones exotérmicas transforman parte de la energía química de la biomasa en energía térmica. Dentro de estos métodos se encuentran la combustión y la pirolisis. La energía térmica obtenida puede utilizarse para calefacción; para uso industrial, como la generación de vapor; o para transformarla en otro tipo de energía, como la energía eléctrica o la energía mecánica.

La combustión completa de hidrocarburos consiste en la oxidación de éstos por el oxígeno del aire, obteniendo como productos de la reacción vapor de agua y dióxido de carbono y energía térmica. Véanse también: Generación de energía eléctrica y Central termoeléctrica. Desde la Edad Antigua se obtiene carbón vegetal mediante pirolisis, que consiste en la combustión incompleta de biomasa a unos 500 °C con déficit de oxígeno. El humo producido en esa combustión es una mezcla de monóxido y dióxido de carbono, hidrógeno e hidrocarburos ligeros.

En Perú, no se cuenta con un inventario de las fuentes de biomasa. La clasificación oficial de las mismas es parcial. En 1990 se realizó un diagnóstico de los recursos energéticos de la biomasa en el Perú.

Tabla N° 1: Recursos energéticos de biomasa en el Perú

| BIOMASA | POTENCIAL TEÓRICO (GWh/año) |
|--|--|
| Forestal | |
| Bosques de libre disponibilidad ¹ | 767 580 |
| Residuos | |
| Agrícolas | 8 048 |
| Pecuarios | 13 235 |
| Vacuno | 4 800 |
| Urbano (por 4 millones de personas) | 2 908 |
| Agroindustriales | |
| Bagazo de caña | 4700 |
| Cáscara de arroz | 710 |
| Residuos de aserraderos | 372 |

Fuente: MINEM-OTERG, 1990

¹Según INRENA, los bosques de libre disponibilidad son aquellos que pueden ser utilizados por cualquier persona autorizada, y quedan abiertos al otorgamiento de contratos de extracción forestal sobre áreas de hasta 100 mil hectáreas y por periodos de 10 años renovables. Los bosques de libre disponibilidad ocupan 36,8 millones de hectáreas de extensión (38 bosques).

2.1.2. Referencias Históricas.

Cuba: Dada la disminución de las reservas de materias orgánicas fósiles, en los últimos años en todo el mundo se dedica mucha atención al tratamiento químico y biotecnológico de la biomasa vegetal de madera y plantas agrícolas. La biomasa vegetal (fitomasa) se forma como resultado de la actividad fotosintética de las plantas. A diferencia de las fuentes fósiles, las reservas de fitomasa se renuevan como resultado de la actividad de las plantas superiores. Cada año en el planeta se forman cerca de 200 millones de toneladas de biomasa vegetal celulósica. La biosíntesis de la celulosa es la mayor de las síntesis en el pasado, presente y futuro. En este siglo los principales tipos de materiales orgánicos serán la madera, las plantas agrícolas y el carbón de piedra que a su vez es de origen vegetal. Por una valoración aproximada, las reservas conocidas de petróleo son prácticamente iguales a las de la madera en nuestro planeta, sin embargo, los recursos petroleros se agotan, al tiempo que los de maderas, como resultado del crecimiento natural, se elevan (Jolkin, 1989).

España: La biomasa es la fuente con mayor potencial de crecimiento, en usos térmicos, en generación eléctrica y en aplicaciones actualmente en desarrollo como son los Biocarburantes y el biogás. La biomasa incluye una gran variedad de productos que van desde la biomasa forestal hasta los diferentes subproductos agrícolas, procedentes de la industria agroalimentaria y de la industria de la madera. Todos estos productos tienen actualmente un uso energético como materia prima. Sin embargo, su uso no es completo, existiendo todavía una capacidad remanente no utilizada. Existen también unas importantes expectativas con los cultivos energéticos, con un interesante trabajo realizado de investigación para identificar y optimizar aquellos que mejor se adapten a nuestras características específicas del territorio y clima. El carácter renovable y no

contaminante que tiene la biomasa, y el papel que puede jugar en la generación de empleo y aceleración o activación de la economía de algunas zonas rurales, hacen que sea considerada una clara alternativa de futuro, que puede contribuir al reequilibrio territorial y a hacer más sostenible el modelo socioeconómico de Aragón. Actualmente, las tecnologías modernas permiten adaptar la biomasa a usos industriales, a la generación eléctrica, a la generación conjunta de calor y energía eléctrica (cogeneración), o a satisfacer las necesidades energéticas de amplias zonas residenciales, además de los usos ya tradicionales del sector doméstico.

- **La biomasa térmica:** El consumo de biomasa en el sector industrial representa aproximadamente el 40% del consumo final de biomasa en Aragón - España. Dentro de este sector, los subsectores con mayor consumo de biomasa son el de la madera y el corcho y el de pastas papeleras, papel y cartón, representando el 86% del consumo final industrial. En la industria de la madera y corcho, todo el consumo energético de biomasa es lógicamente de origen forestal, y se trata de residuos de madera generados en los propios procesos industriales (virutas, serrín, tableros, etc.). Estos residuos representan cerca del 70% del consumo total industrial. Por su parte, el consumo en el sector Residencial, Comercial y Servicios representa aproximadamente el 70% del consumo final de biomasa en Aragón. Para el periodo 2005-2012 se prevé un incremento en el consumo final de biomasa de 69.370 tep, lo que supone alcanzar en 2012 un valor de 199.659 tep, un incremento de más del 53% en todo el periodo, ya que en 2004 se consumían en Aragón 130.289 tep de biomasa final (Plan Energético de Aragón).
- **Biomasa eléctrica:** En la prospectiva analizada se contemplan distintas vías para el aprovechamiento energético de la biomasa para producción de energía eléctrica. Así, se prevé la instalación

de 50 MW de centrales de cogeneración con biomasa durante el periodo 2005-2012, que sumados a los 21 MW de potencia en 2004, permitirán alcanzar una producción total de energía eléctrica de 428.334 MWh en 2012. Las instalaciones que se tiene previsto instalar serán de media y pequeña potencia, de 1 a 15 MW. Por otro lado, hay que tener en cuenta la flexibilidad de la biomasa para seguir una curva de demanda eléctrica prefijada. Asimismo, se prevé una nueva salida en el consumo de biomasa para producir energía eléctrica a partir de las plantas de gasificación, en las que se gasifica la biomasa, utilizando este gas para generar electricidad o conjuntamente energía eléctrica y calor, mediante un sistema de cogeneración. Se ha planificado para el periodo la instalación de 6 MW, con una producción asociada de 39.654 MWh en 2012. El aprovechamiento energético del carbón que existe en la Comunidad Autónoma de Aragón, representa un claro potencial de desarrollo de las tecnologías de co-combustión en las centrales existentes. En resumen, el potencial energético de producción eléctrica asociado al campo de la biomasa en el 2012 presenta un valor de 827.988 MWh, que representa un 5,4% de la producción de energía renovable total en este año.

La biomasa podría proporcionar energías sustitutivas a los combustibles fósiles, gracias a agro combustibles líquidos (como el biodiesel o el bioetanol), gaseosos (gas metano) o sólidos (leña), pero todo depende de que no se emplee más biomasa que la producción neta del ecosistema explotado, de que no se incurra en otros consumos de combustibles en los procesos de transformación, y de que la utilidad energética sea la más oportuna frente a otros usos posibles (como abono y alimento, véase la discusión que para España plantea Carpintero, 2006).

Actualmente (2009), la biomasa proporciona combustibles complementarios a los fósiles, ayudando al crecimiento del

consumo mundial (y de sus correspondientes impactos ambientales), sobre todo en el sector transporte (Estevan, 2008). Este hecho contribuye a la ya amplia apropiación humana del producto total de la fotosíntesis en el planeta, que supera actualmente más de la mitad del total (Naredo y Valero, 1999), apropiación en la que competimos con el resto de las especies.

Biomasa como energía alternativa. Todos los procesos que se puede aplicar al aprovechamiento de la biomasa, se debe analizar algunas características a la hora de enjuiciar si el combustible obtenido puede considerarse una fuente renovable de energía:

- Emisiones de CO₂ (dióxido de carbono). En general, el uso de biomasa o de sus derivados puede considerarse neutro en términos de emisiones netas si sólo se emplea en cantidades a lo sumo iguales a la producción neta de biomasa del ecosistema que se explota. Tal es el caso de los usos tradicionales (uso de los restos de poda como leña, cocinas de bosta, etc.) si no se supera la capacidad de carga del territorio.
- En los procesos industriales, puesto que resulta inevitable el uso de otras fuentes de energía (en la construcción de la maquinaria, en el transporte de materiales y en algunos de los procesos imprescindibles, como el empleo de maquinaria agrícola durante el cultivo de materia prima), las emisiones producidas por esas fuentes se contabilizan como emisiones netas. En procesos poco intensivos en energía pueden conseguirse combustibles con emisiones netas significativamente menores que las de combustibles fósiles comparables. Sin embargo, el uso de procesos inadecuados (como sería la destilación con alambique tradicional para la fabricación de orujos) puede conducir a combustibles con mayores emisiones.

- Hay que analizar también si se producen otras emisiones de gases de efecto invernadero. Por ejemplo, en la producción de biogás, un escape accidental puede dar al traste con el balance cero de emisiones, puesto que el metano tiene un potencial 21 veces superior al dióxido de carbono, según el IPCC.
- Si la materia prima empleada procede de residuos, estos combustibles ayudan al reciclaje. Pero siempre hay que considerar si la producción de combustibles es el mejor uso posible para un residuo concreto.
- Algunos de estos combustibles (bioetanol, por ejemplo) no emiten contaminantes sulfurados o nitrogenados, ni apenas partículas sólidas; pero otros sí (por ejemplo, la combustión directa de madera).
- Otras características de la biomasa.

2.2. MARCO LEGAL.

- Ley de promoción de la inversión para la generación de electricidad con el uso de energías renovables - Decreto Legislativo 1002 (mayo 2008).
- Reglamento de la generación de electricidad con energías renovables Decreto Supremo 012-2011-EM (Marzo 2011). Reemplaza al Reglamento original (Decreto Supremo 050-2008-EM).
- Bases Consolidadas de la primera Subasta con Recursos Energéticos Renovables (RER), aprobadas mediante Resolución Viceministerial N° 113-2009-MEM/VME del Ministerio de Energía y Minas.
- Bases Consolidadas de la segunda Subasta con Recursos Energéticos Renovables (RER), aprobadas mediante Resolución Viceministerial N° 036-2011-MEM/VME del Ministerio de Energía y Minas.
- Decreto Legislativo de Promoción de la Inversión para la Generación de Electricidad con el Uso de Energías Renovables. Define como Energías renovables no convencionales a:
 - Solar Fotovoltaico
 - Solar Térmico

- Eólico
- Geotérmico
- Biomasa
- Hidroeléctrico sólo hasta 20 MW
- Energías Renovables en la Matriz de Generación Eléctrica Indica que el MINEM establecerá cada 5 años un porcentaje objetivo en que debe participar, en el consumo nacional de electricidad, la electricidad generada a partir de Recursos Energéticos Renovables (RER), tal porcentaje objetivo será hasta 5% anual durante el primer quinquenio.
- Las mini Hidroeléctricas se encuentran excluidas del porcentaje objetivo. La cantidad a subastar de ellas es definida por el MINEM.
- Comercialización de energía y potencia generada con Energía Renovable Tiene prioridad en despacho (se le considera con costo variable de producción igual a cero), primas preferenciales en subastas (recargadas al peaje de transmisión), prioridad en conexión a redes, además de fondos para investigación y desarrollo.
- OSINERGMIN fija las tarifas base (máximas) y primas, por categorías y tecnología de ER y mediante mecanismos de subasta.
- Las primas son cubiertas por los usuarios como un recargo anual en el Peaje por Transmisión.
- OSINERGMIN convocará la subasta en un diario nacional y un medio especializado internacional.

2.3. MARCO CONCEPTUAL

- **Biomasa.** Materia total de los seres que viven en un lugar determinado, expresada en peso por unidad de área o de volumen. Materia orgánica originada en un proceso biológico, espontáneo o provocado, utilizable como fuente de energía.
- **Biomasa calculada:** Es el valor obtenido del reemplazo de las variables independientes en el modelo alométrico escogido, por los valores de las medidas dasométricas obtenidas.

- **Biomasa real:** Es el peso seco registrado en laboratorio luego del proceso de secado en la estufa.
- **Bosque:** Es un área con una alta densidad de árboles, cubren grandes áreas del globo terráqueo y funcionan como hábitats animales, moduladores de flujos hidrológicos y conservadores del suelo. Aunque a menudo se han considerado como consumidores de dióxido de carbono, los bosques maduros son prácticamente neutros en cuanto al carbono, y son solamente los alterados y los jóvenes los que actúan como dichos consumidores. De cualquier manera, los bosques maduros juegan un importante papel en el ciclo global del carbono, como reservorios estables de carbono y su eliminación conlleva un incremento de los niveles de dióxido de carbono atmosférico.
- **DAP:** Diámetro del tronco de un árbol generalmente medido a 1.30 m. de altura del suelo y corresponde a la altura del pecho de un adulto.
- **Entrenudo:** Es la parte del tallo comprendida entre dos nudos.
- **Esqueje:** Llamados también gajos son fragmentos de plantas separados con una finalidad reproductiva. Pueden cortarse fragmentos de tallo e introducirlos en la tierra, para producir raíces. Las plantas enraizadas de esta manera serán idénticas a sus progenitoras, es decir, formarán con ellas un clon.
- **Masa:** algunos combustibles de madera, como el carbón vegetal y el licor negro, se miden en unidades de masa. Las unidades principales de masa utilizadas para medir los productos energéticos son el kilogramo y la tonelada métrica. La tonelada métrica (1 000 kg) es la unidad utilizada más habitualmente.
- **Volumen:** las unidades de volumen se utilizan habitualmente para medir la madera en rollo y la leña. Las unidades SI de volumen básico son el

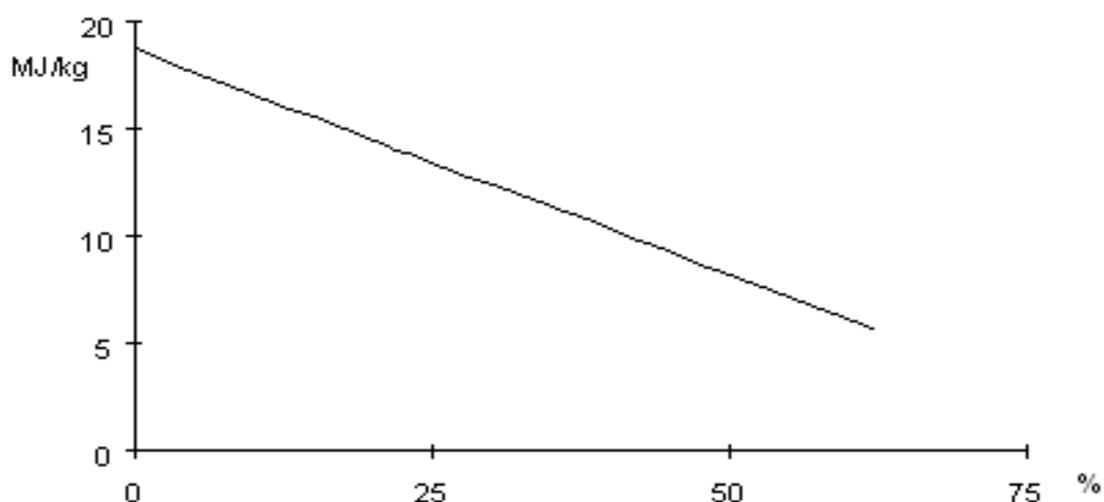
litro y el kilolitro, que equivale al metro cúbico. El estéreo o volumen apilado, que se considera habitualmente como equivalente a 0,65 metros cúbicos sólidos se ha utilizado frecuentemente en el pasado para medir el volumen de combustible de madera. En la actualidad, la FAO y los forestales y otros expertos prefieren medir la madera y la leña utilizando unidades de volumen sólido, generalmente el metro cúbico (MCU).

- **Densidad:** la densidad de la madera, es decir, el peso por unidad de volumen, varía ampliamente entre diferentes especies y tipos de madera. Las especies utilizadas habitualmente para obtener leña suelen tener un peso de 650 a 750 kg/MCU. Es importante observar la influencia del contenido de humedad en la densidad de la madera. Cuanto mayor sea el agua por unidad de peso menor será la cantidad de leña. Por ello, es imperativo precisar con exactitud del contenido de humedad al establecer el peso de la leña.
- **Humedad:** la cantidad de agua existente en el biocombustible afecta de forma decisiva a la energía disponible de cada biocombustible. Habitualmente, se utilizan dos métodos (referido al producto en seco (ref.pr.seco) y referido al producto en húmedo (ref.pr.húm.) para establecer el contenido de humedad, según el procedimiento utilizado para contabilizar la masa de agua. Es importante distinguirlos, especialmente cuando el contenido de humedad es elevado.
- **Contenido de ceniza:** otro factor importante del contenido de energía del biocombustible es el contenido de ceniza, que se mide siempre con referencia al producto en seco y se refiere al residuo sólido que persiste tras una combustión total. Si bien el contenido de ceniza de la leña es generalmente del 1 por ciento, algunas especies de agrocombustibles pueden tener un contenido de ceniza muy elevado. Esto influye en el valor energético de los biocombustibles, dado que las sustancias que forman las cenizas no tienen, por lo general, valor energético. Así, los combustibles de madera con un contenido de ceniza del 4 por ciento

tienen un 3 por ciento menos de energía que la biomasa cuyo contenido de ceniza es del 1 por ciento.

- **Poder calorífico:** el biocombustible es un material para quemar o para utilizar como fuente térmica de energía. Se puede medir la cantidad de energía térmica almacenada mediante el valor térmico o calorífico. El poder calorífico superior (PCS) o poder calorífico bruto (PCB) mide la cantidad total de calor que se producirá mediante la combustión. Sin embargo, una parte de ese calor permanecerá en el calor latente de la evaporación del agua existente en el combustible durante la combustión. El poder calorífico inferior (PCI), o poder calorífico neto (PCN), excluye el calor latente. Por consiguiente, el valor térmico más bajo es la cantidad de calor disponible realmente en el proceso de combustión para captarlo y utilizarlo. Cuanto mayor sea el contenido de humedad de un combustible mayor será la diferencia entre el PCB y el PCN y menor será la energía total disponible, como se muestra en la figura N° 4. Estos parámetros se expresan generalmente en megajulios (MJ/kg) o kilojulios por kg (kJ/kg).

Figura N° 4: Efecto de la humedad (referida al producto en húmedo) sobre el valor térmico



2.4. MARCO TEÓRICO

2.4.1. Panorámica de la Biomasa como Recurso Energético

1) Concepto de Biomasa como Recurso Energético

Etimológicamente, el término “biomasa” se aplica a la materia de la que están formados los seres vivos. En un sentido energético se considera como "biomasa" a un conjunto muy heterogéneo de materiales cuyo punto en común es que están constituidos por materia orgánica que, se ha formado en una atmósfera de composición igual o muy semejante a la actual; es decir, son materiales con un origen biológico próximo. Por esta razón se excluyen del término biomasa a los combustibles como el petróleo y el carbón ya que no se han producido en los tiempos actuales y, además, han sufrido un proceso de mineralización. Asimismo, se excluyen del término biomasa a los materiales orgánicos que han quedado incluidos en formaciones geológicas.

La legislación de diferentes países excluye del término "biomasa" entendida como recurso energético, cualquier tipo de residuo orgánico que se catalogue como tóxico o peligroso.

2) Fundamentos de la Producción de Energía con Biomasa

El recurso de la biomasa constituye una de las fuentes de energía que se conocen con el nombre de “energías renovables”. Estas energías se caracterizan por su carácter prácticamente inagotable, debido a que se producen directa o indirectamente de la luz solar.

Todos los productos que componen la biomasa tienen, efectivamente, su origen en la energía solar de la que se producen a través del proceso de fotosíntesis que realizan las plantas

verdes. Mediante este proceso, las plantas verdes en sus cloroplastos son capaces de captar la luz o radiación solar fotosintéticamente activa (radiación PAR) y transformarla en energía del enlace químico de las moléculas que integran sus tejidos y posteriormente acumularla en la materia que constituye sus tejidos y, de forma especial, en diferentes macromoléculas vegetales como el almidón, la celulosa y la lignina que constituyen sus reservas energéticas.

La ecuación global del proceso de la fotosíntesis es la siguiente:



Como puede observarse, el proceso utiliza dióxido de carbono (CO_2) atmosférico y agua como materias primas para la producción de la materia orgánica (H-CHO) que compone los tejidos de los seres vivos, de tal forma que por cada mol de CO_2 utilizado 476 kJ de energía solar se transforman en energía del enlace químico. La utilización del dióxido de carbono en este proceso posee, además, una significación de gran trascendencia en cuanto al papel que la producción y uso de la biomasa puede tener para controlar las emisiones de este gas invernadero.

De acuerdo a lo descrito, puede considerarse la biomasa como una forma de energía solar en la que el receptor, transformador y acumulador de la energía solar no es un sistema artificial sino un sistema natural seleccionado por la naturaleza para tal fin durante millones de años.

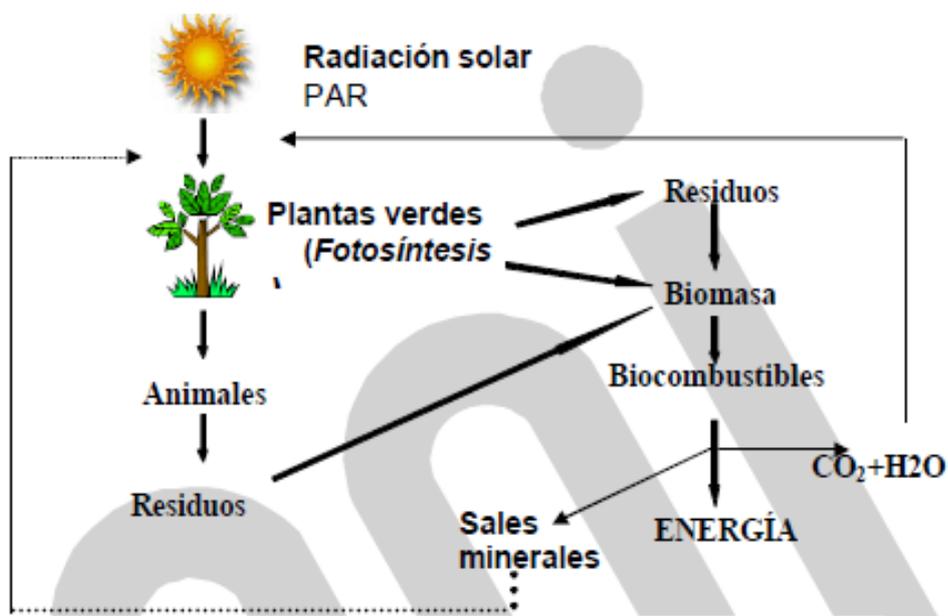
La energía solar así transformada y acumulada en las macromoléculas de las plantas se transfiere posteriormente a los animales a través de las cadenas tróficas.

En este contexto, la producción de energía de la biomasa está basada en la utilización de los materiales residuales producidos por los animales e incluso las propias plantas como tales, para la obtención de energía mediante un proceso de oxidación de la materia orgánica en el que, en uno o varios pasos, se libera en forma de calor la energía acumulada en los enlaces químicos de los materiales biomásicos y que es utilizada posteriormente en diversas aplicaciones. En este sentido, hay que considerar a la obtención de energía a partir de la biomasa como un proceso acelerado respecto al que se produce naturalmente y que es conocido como putrefacción.

La serie de etapas que van desde la producción de la biomasa hasta la obtención de energía para una determinada aplicación constituyen una cadena energética de la biomasa. Por lo general, en las diferentes cadenas energéticas de la biomasa existen etapas intermedias en las que la materia prima original es transformada en productos de oxidación intermedios cuyas características corresponden mejor a las necesidades de las diferentes aplicaciones energéticas en las que la biomasa es utilizada. Se denominan con el término genérico de “biocombustibles” a los combustibles intermedios que se producen en las cadenas energéticas de la biomasa.

En la Figura N° 5 se representa el esquema del ciclo energético general de la biomasa, en el que puede apreciarse como todas las cadenas energéticas terminan liberando CO₂, H₂O y sales minerales como productos principales de la combustión, volviéndose a repetir el ciclo.

Figura N° 5: Esquema del ciclo energético de la biomasa



Como se verá en detalle más adelante, los biocombustibles derivan de la biomasa original mediante el tratamiento de la misma por procesos físicos, químicos, termoquímicos y/o biológicos y dependiendo de su naturaleza pueden ser biocombustibles sólidos, líquidos o gaseosos. Los biocombustibles líquidos se utilizan principalmente en el sector del transporte y se suelen denominar entonces Biocarburantes, mientras que los biocombustibles sólidos y gaseosos se emplean, por lo general, en la producción de energía térmica y eléctrica. Esta diversidad en cantidad y calidad de los biocombustibles, convierten a la biomasa en un recurso con una gran flexibilidad, comparable a la del petróleo, como recurso energético, lo cual supone una gran ventaja en comparación con otras nuevas energías.

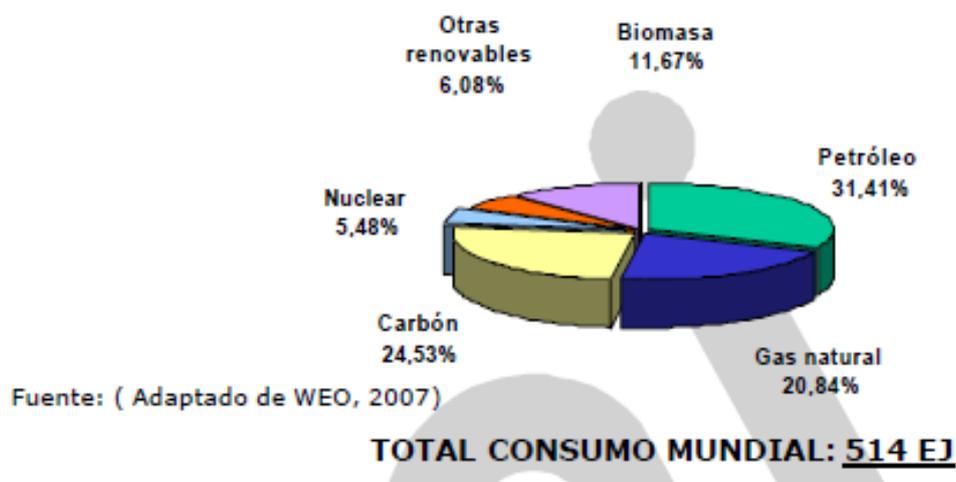
Comúnmente se suele utilizar también el término “biomasa” para denominar a los biocombustibles sólidos obtenidos de ella.

3) Utilización Energética de la Biomasa

La biomasa en forma de lo que se denomina genéricamente como "leñas" o "madera" fue la primera y única fuente energética utilizada por el hombre hasta el advenimiento del carbón y puede decirse que ha continuado siendo el principal recurso energético hasta principios de la era industrial, a comienzos del siglo XIX. En nuestros días la biomasa sigue constituyendo una de las principales fuentes energéticas de la humanidad.

La biomasa supuso en 2006 a nivel mundial un aporte de energía primaria de alrededor de 61EJ, casi el 12% de la energía primaria mundial (Figura N° 6), lo que la convierte en el cuarto recurso energético mundial, tras los diferentes combustibles fósiles.

Figura N° 6: Consumo energético mundial en 2004



La biomasa supone alrededor del 65% de la energía producida con fuentes renovables, incluida la gran hidráulica y en los últimos años la energía producida con biomasa está experimentando un crecimiento en torno al 3,5% anual (más del 4% en los países industrializados), similar al crecimiento de la demanda energética. Esta tendencia podría decantarse en la próxima década del lado de la biomasa que podría llegar a crecer a un ritmo alrededor de

dos veces superior al de la demanda energética, una vez que el crecimiento de ésta se modere en torno al 2% anual y se incremente el uso de la biomasa como consecuencia del desarrollo de los programas de fomento actuales y la puesta en marcha de nuevas iniciativas en todo el mundo.

La biomasa no es utilizada de forma uniforme en todos los países, pudiéndose establecer unas diferencias claras tanto en cantidad como en calidad del consumo entre los países más industrializados y los que se encuentran en vías de desarrollo.

En términos de cantidades, en la actualidad puede estimarse que alrededor de un 40% de la energía producida de la biomasa se lleva a cabo en países del área de la OCDE en los que la biomasa supone en torno a un 4,5% de la energía primaria consumida, si bien esta cantidad se sitúa incluso por encima del 20% en algunos países como Suecia y Finlandia en los que la utilización de la biomasa se considera como un instrumento de gran importancia para el aseguramiento de su demanda energética con recursos propios y como una alternativa viable para cumplir con sus compromisos de reducción de emisiones de gases invernadero contraídos en el Tratado de Kyoto.

Los países en vías de desarrollo producen en torno al 60% de la energía de la biomasa, que constituye, globalmente, más de un 30% de su energía primaria (Tabla N° 2) y una de sus principales fuentes energéticas. El porcentaje mencionado llega a cifras muy superiores en diferentes regiones, como en los países africanos del Sahel (Senegal, Mali, Burkina Faso, Gambia, Niger) en los que la biomasa constituye más de un 80% de su energía primaria.

Tabla N° 2: Consumo energético y energía de la biomasa en diferentes zonas del mundo. Datos en 1998

| REGION | CONSUMO DE ENERGIA PRIMARIA PJ/año | CONSUMO DE BIOMASA | BIOMASA / ENERGIA PRIMARIA |
|---------------|---|---------------------------|-----------------------------------|
| Asia | 96.140 | 25.080 – 33.440 | > 30 |
| África | 17.720 | 8.360 – 11.286 | > 50 |
| Mundo | 401280 | 41800 – 62700 | 11 – 15 |

Fuente: Comisión Europea

En términos cualitativos es importante, asimismo, tener en cuenta la diferente manera de cómo se está utilizando la biomasa en cuanto a tecnologías y eficiencia en los países industrializados en relación a los que se encuentran menos desarrollados. En los primeros, la biomasa se produce de forma renovable y, por tanto, básicamente sostenible para el medioambiente y se utiliza con tecnologías modernas de alta eficiencia energética y bajos niveles de emisión. En cambio, en los segundos, principalmente en los países africanos, la biomasa se emplea fundamentalmente en forma de leña en pequeños equipos de combustión para la cocina doméstica que presentan una energética muy baja eficiencia (15-20%), lo que lleva aparejados unos niveles muy altos de emisiones que son perjudiciales para la salud humana, sobre todo de las mujeres y los niños que permanecen más tiempo en las viviendas. Por otra parte, la escasez de otro tipo de combustible, determina que en muchos países subdesarrollados la utilización energética de la madera se esté asociando a procesos de deforestación.

El potencial energético de todos los materiales biomásicos que se producen anualmente es muy significativo. Whittaker, en un estudio ya clásico realizado en 1975, estimó este potencial en 2845,7 EJ/año (Tabla N° 3), lo que supone más de seis veces la energía primaria consumida actualmente en el mundo. Alrededor

del 60% de la biomasa es generada, según puede apreciarse en el cuadro N° 6, en el medio terrestre, mientras que el 40% restante se produce en las aguas continentales y marinas.

Tabla N° 3: Producción anual estimada de biomasa en los diferentes ecosistemas

| MACROSISTEMA | SUPERFICIE OCUPADA (%) | PRODUCCION (MTEP) |
|---------------------|-------------------------------|--------------------------|
| Océanos | 70.8 | 22.000 |
| Bosques | 11.2 | 31.960 |
| Prados y Estepas | 4.7 | 7.560 |
| Cultivos Agrícolas | 2.7 | 3.640 |
| Desiertos y Tundras | 9.8 | 1.120 |
| Aguas Continentales | 0.8 | 1.800 |
| TOTAL | 100.0 | 68.080 |

De este potencial se ha estimado que puede utilizarse con las tecnologías actuales y de forma sostenible alrededor de 270EJ/año, casi seis veces la biomasa utilizada realmente lo que otorga a este recurso un potencial que soporta importantes objetivos de crecimiento tanto a corto como a largo plazo.

El potencial de la biomasa como recurso energético puede verse además incrementado con el desarrollo de alternativas que determinen un aumento de la biomasa utilizable en la biosfera, como puede ocurrir en el caso de la implantación masiva de sistemas forestales y de cultivos energéticos, así como con el desarrollo de nuevas tecnologías y procesos que permitan una mayor producción y uso de la biomasa de forma sostenible.

Además de su indudable interés como recurso energético, la producción y uso energético de la biomasa está asociada a numerosas ventajas que pueden convertir a este recurso en un

importante instrumento a nivel mundial para el logro de objetivos medioambientales y sociales relevantes.

Bajo un punto de vista medioambiental, la producción y uso de la biomasa cuenta con singulares e importantes ventajas. Entre ellas cabe destacar el hecho de estar su uso energético asociado a la eliminación de un gran número de materiales residuales cuya acumulación en el medio ambiente puede ocasionar graves problemas. Tal es el caso de los residuos ganaderos y urbanos. Asimismo, es la única fuente de energía que cuenta con un balance prácticamente neutro respecto a emisiones de CO₂ en su ciclo completo, sobre todo en sus aplicaciones de calor y electricidad, por lo que, como se ha mencionado anteriormente puede ser un instrumento muy eficaz para controlar el principal gas invernadero. Bajo el punto de vista social, la biomasa constituye el recurso energético cuya utilización promueve un mayor número de empleos, incluidas el resto de las renovables, fundamentalmente en áreas rurales, por lo que su introducción comercial puede ser una alternativa de gran importancia para el mantenimiento de la población rural y el incremento de su nivel de vida.

2.4.2. La Biomasa como Recurso Energético.

1) Tipos de Biomasa y Evaluación de Recursos

En el apartado anterior se presentaron las cifras globales que enmarcan la producción y uso actuales de la biomasa para la producción de energía. A continuación se describen los distintos tipos de biomasa, su potencial como recurso energético y el nivel actual de utilización en relación a los recursos disponibles totales y se describen los principios para llevar a cabo estudios de evaluación de la cantidad de biomasa disponible de forma sostenible para su uso energético.

a) Tipos de biomasa

Los materiales que componen la biomasa pueden clasificarse de acuerdo a diferentes criterios. Así, atendiendo a los componentes principales que bajo un punto de vista de los principales compuestos que entran a formar parte de su composición, los materiales biomásicos pueden dividirse en:

- **Biomosas azucaradas.** Entran dentro de este grupo aquellas biomosas con un alto contenido en azúcares solubles, generalmente sacarosa. La caña de azúcar y la remolacha, cuando se utilizan con fines energéticos, son dos ejemplos importantes dentro de este grupo.
- **Biomosas amiláceas.** Las biomosas amiláceas poseen en su composición cantidades importantes de almidón (poliglucosa) o de poliazúcares semejantes al almidón, tales como la inulina, que es un polímero integrado por fructosa y glucosa. Dentro de este grupo se sitúan los granos de cereales y la cassava (vegetales que contienen almidón en sus semillas y raíces, respectivamente) y la patata, especie de la familia de las compuestas que produce tubérculos con un alto contenido en inulina.
- **Biomosas oleaginosas.** Contienen aceites vegetales en sus semillas o frutos. Son ejemplos el girasol, la palma, la colza y la soja.
- **Biomosas lignocelulósicas.** Los componentes principales de este tipo de biomasa son la celulosa y la lignina. La madera, en general, y la paja de cereales son ejemplos típicos de biomosas comprendidas en este grupo. Este tipo de biomosas son las más abundantes y constituyen alrededor de un 65% de la biomasa total que se produce en el planeta:

Es de reseñar que diferentes biomásas pueden considerarse a la vez comprendida en varios de los grupos mencionados. Así, la caña de azúcar contiene una proporción importante de azúcar, pero también de lignocelulosa, que constituye el bagazo tras la extracción de la anterior fracción. Por tanto la caña de azúcar se considera tanto biomasa azucarada como lignocelulósica, dependiendo de la aplicación final en cada caso.

Otra forma en que suelen clasificarse las materias primas biomásicas es atendiendo a su origen de producción. Siguiendo este criterio, los materiales biomásicos pueden clasificarse en:

- **Biomasa natural.** Se define así aquella biomasa que se genera en los bosques y ecosistemas naturales, tanto en forma de residuos como en forma de árboles y plantas en general, que pueden utilizarse para la obtención de energía. Este tipo de biomasa constituye la forma de energía tradicional en la mayor parte de los países en vías de desarrollo.
- **Biomasa antropogénica.** Como su nombre indica, es aquella cuya formación se produce como consecuencia de la actividad humana. A su vez puede dividirse en:
 - a) **Biomasa residual.** Se produce como resultado de las actividades agrícolas, forestales y de industrias derivadas de ambas y también puede incluirse en este apartado la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos, que resulta tras el proceso de clasificación selectiva de los mismos.

De acuerdo a la anterior definición, la biomasa residual comprende:

- i) Residuos forestales.** Esta biomasa se obtiene de las labores selvícolas realizadas en los terrenos forestales de explotación maderera o para otros usos, que constituyen la mayor parte de los bosques existentes en los países industrializados.

Como labores selvícolas que generan mayor cantidad de residuos pueden citarse los desbroces, claras, clareos y, sobre todo, las cortas finales, que pueden incluir un descortezado de los arboles in situ.

En la Unión Europea (UE), la producción potencial media de residuos forestales en un bosque maderero oscila entre las 2 - 2.5 toneladas de materia seca por hectárea y año en los países de centro y norte de Europa, y en torno a 1 - 1.5 toneladas por hectárea y año en los países mediterráneos (sur de la UE). Estas cifras superan las 5 toneladas/ha/año en el caso de los bosques tropicales.

Algunos estudios consideran que, por limitaciones medioambientales y para una explotación sostenible de este recurso, tan sólo un 45-50% de esta producción se debería de extraer, dejando sobre el suelo aquellas fracciones, como pequeñas ramas y hojas, que contienen la mayor parte de los nutrientes.

ii) Residuos industriales forestales. Son los producidos por las industrias de la madera.

Las industrias de transformación de la madera producen como residuo en sus procesos más de un 60% del peso de la madera bruta que manufacturan. Estos residuos están integrados por serrines, cortezas, virutas, costeros etc., y constituyen en la actualidad una de las fuentes de biomasa más utilizadas energéticamente, por su bajo coste, escasa o nula necesidad de tratamiento antes de su combustión y la posibilidad de aprovechamiento en las industrias que los generan.

También se incluyen en este apartado las lejías negras de las papeleras, que suelen emplear estas industrias como combustible, una vez concentradas al 50-60% de sólidos, para la producción de vapor de proceso y electricidad.

iii) Residuos agroindustriales sólidos. Son aquellos residuos sólidos o semisólidos producidos por las industrias agrícolas. Algunos residuos sólidos suelen presentar un alto contenido de humedad. **CURIOSIDAD.** El bagazo de caña de azúcar constituye actualmente un residuo agroindustrial sólido muy importante a nivel mundial existiendo en diferentes países, entre ellos Brasil, programas para su utilización para generación eléctrica en cogeneración, en las propias destilerías de bioetanol que allí operan. El potencial de este residuo sólo en dicho país se estima suficiente para abastecer una capacidad de generación eléctrica instalada de 9000

MW. Otro residuo agroindustrial sólido de gran importancia es la cascarilla y paja del arroz. En los países mediterráneos, entre ellos España, dos residuos de este tipo de gran importancia son el orujillo y el alperujo, resultantes de los procesos de extracción del aceite de oliva.

iv) Residuos agrícolas. Este tipo de biomasa está formada por los residuos que se generan sobre el propio campo de cultivo agrícola tras la recolección de las cosechas. Atendiendo a la naturaleza de su biomasa, estos residuos pueden clasificarse en herbáceos y leñosos.

Dentro del primer grupo se sitúan la paja de cereales, que es el principal residuo agrícola en las zonas frías y templadas del planeta. Otros materiales importantes dentro de este grupo son el cañote y mazorca del maíz y el cañote y cabezuela del girasol.

En el grupo de los residuos leñosos se incluyen los resultantes de la poda de árboles frutales, del olivo y los sarmientos de la vid, entre otros.

La biomasa procedente de residuos agrícolas es la más abundante en los países desarrollados y en muchos en vías de desarrollo pero, por diferentes motivos que serán mencionados más adelante, es la menos utilizada en la actualidad. Así, en la Unión Europea, menos de un 10% de la producción de la paja de cereales es empleada para fines energéticos, mientras que su utilización en otros mercados no suele superar el 60% de la producida.

v) Residuos orgánicos (biodegradables). Aunque el término técnicamente no es muy correcto, se suelen denominar así a un conjunto de residuos entre los que se incluyen los ganaderos, agroindustriales líquidos, aguas residuales orgánicas, fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos y los lodos de depuradora.

Todos estos materiales residuales tienen en común que su tratamiento puede efectuarse mediante digestión anaerobia, para producir biogás.

b) Cultivos energéticos. Este tipo de biomasa proviene de especies vegetales que se cultivan específicamente para la producción de energía.

En no pocos casos los cultivos energéticos son las mismas especies agrícolas o forestales pero, en general, con distintas condiciones de cultivo. Así ocurre, por ejemplo, con especies forestales como el chopo, sauce o eucalipto. Estas especies cuando van a ser dedicadas para su uso energético se cultivan a turnos de corta mucho menores y densidades de plantación mayores que cuando se destinan a la producción de madera o de papel (Figura N° 7). Además, en el caso de la explotación para energía, se utiliza la madera de los rebrotes, por lo que no es necesario replantar tras cada corta. Así, estas especies forestales cuando se producen para su uso energético se refieren como cultivos leñosos de corta rotación y en alta densidad.

Entre las características más importantes que son exigibles a un cultivo energético figuran las siguientes:

- Alta productividad de biomasa
- Alta eficiencia en la utilización del agua y de los nutrientes. Esto significa que, en términos específicos y también absolutos, deben tener pocas necesidades de cultivo en cuanto a agua y fertilizantes, a efectos de producir gran cantidad de biomasa con relativamente pocos recursos.
- Resistencia a plagas. Deben ser poco susceptibles de enfermedades a fin de minimizar el uso de pesticidas en su cultivo.
- Escasa necesidad de labores agrícolas.
- Asimismo deben ser resistentes al frío y al calor y preferiblemente ser capaces de producir formas de rebrote al efecto de minimizar los costos de siembra.

Todas estas características se relacionan con bajos costos de producción que son necesarios para la competitividad en el mercado energético de esta biomasa, así como, por lo general, con un menor impacto ambiental que los cultivos intensivos agrícolas. Asimismo, como consecuencia de las anteriores características, los cultivos energéticos suelen presentar balances energéticos muy positivos, condición exigible en la producción de cualquier combustible. En las experiencias de demostración realizadas en Estados Unidos y en la UE, los cultivos energéticos herbáceos muestran balances energéticos (relación entre la energía contenida en la biomasa cosechada y la energía empleada en su producción) en torno a 10 - 12 para las especies forestales en corta rotación, y de 15 - 20 para las especies lignocelulósicas herbáceas.

Figura N° 7: Cosecha de biomasa de sauce en alta densidad y corta rotación



Entre las especies que hoy en día se están dedicando comercialmente a la producción de energía se pueden citar la caña de azúcar y los cereales, materias primas utilizadas para la producción de bioetanol combustible. También cabe citar, aunque con menor implantación comercial que los anteriores, especies oleaginosas como la colza, palma, soja y girasol, que se utilizan en la producción de biodiesel, biocombustible líquido para sustituir al gasóleo.

Asimismo, están en fase demostrativa en diferentes países una serie de cultivos de naturaleza lignocelulósica, tanto especies forestales, como herbáceas.

En el Tabla N° 3 se muestran los cultivos energéticos lignocelulósicos que en estos momentos se perfilan con más posibilidades para su futura implantación comercial en la Unión Europea (UE). De ellos, el chopo, eucalipto

y sauce son especies forestales, mientras que el miscanthus y el cardo *C. cardunculus* son herbáceas perennes y *Brassica carinata* y el sorgo forrajero herbáceas anuales. *Brassica carinata*, especie muy cercana a la colza, y *C. cardunculus* poseen también un interés potencial importante para la producción de biodiesel, dado que además de biomasa producen una cantidad importante de semillas con un atractivo contenido en aceite. Asimismo, son de gran interés y, aunque en cantidades reducidas, se utilizan comercialmente en Europa diversas gramíneas perennes, como *Panicum virgatum* (switchgrass) y *Phalaris arundinacea* (reed canary grass).

Dada la alta productividad de los cultivos energéticos lignocelulósicos, su utilización se prevé relacionada con el abastecimiento de grandes plantas energéticas, principalmente centrales de bioelectricidad.

En los últimos años está creciendo el interés por el cultivo de microalgas, para la producción de biodiesel y/o biomasa sólida. Las algas, que contienen alrededor de un 50% en peso de aceite, se hacen crecer en lagunas o zanjas de poca profundidad a fin de que puedan disponer de luz para realizar la función fotosintética, o bien en tubos transparentes, donde las algas doblan su biomasa cada doce horas. La empresa española Biofuel Systems, por el último procedimiento ha constatado en planta piloto unas productividades diarias de hasta 3kg biomasa seca/m³ de agua. En Argentina Oíl Fox está produciendo a mayor escala alrededor de 100.000l de biodiesel por hectárea cultivada y año. También en Nueva Zelanda y Estados Unidos existen empresas que están desarrollando procesos importantes en esta área.

A pesar de los excelentes resultados a pequeña, existen problemas a la hora de llevar a cabo el escalado de estos procesos debido, entre otros factores, a la excesiva competencia que existe entre las levaduras en grandes sistemas, lo que produce su mortandad y reduce sensiblemente su capacidad productiva.

En la actualidad, el desarrollo de los cultivos energéticos forma parte de los objetivos más importantes en las políticas de desarrollo a corto plazo de las energías renovables de numerosos países. Así, en la Unión Europea, se prevé que alrededor de un 60% del incremento de la producción con energías renovables en la presente década se realice con biomasa de cultivos, para la producción de calor, electricidad y biocarburantes.

Este interés por los cultivos energéticos está basado en lo siguiente:

- La necesidad de disponer de una fuente autóctona de energía cuya producción sea optimizable y planificable en el tiempo.
- La necesidad de dotar de alternativas al sector primario de la producción ante las situaciones de falta de competencia en el mercado alimentario global.
- La necesidad de disminuir el impacto medioambiental causado por la actual agricultura intensiva.
- La disponibilidad de tierras de forma sostenible para la implantación de cultivos energéticos. Según un estudio realizado en 2006 por la Agencia Europea del Medioambiente para la UE-22, en 2030 podrían

existir de forma sostenible no menos de 19,3 Mha de superficie para cultivos energéticos, que podrían aportar en torno a 150 Mtep/año de biomasa.

b) Evaluación de los recursos de la biomasa

La evaluación de los recursos disponibles de biomasa y la determinación de sus costos a pie de planta constituye una etapa crucial en el análisis de viabilidad de cualquier proyecto de producción de energía con biomasa que quiera llevarse a cabo, ya que los resultados obtenidos influyen de forma importante y directa en aspectos tales como el dimensionamiento del proyecto de aprovechamiento energético, la definición de la logística de suministro de biomasa, las características como combustible de la biomasa disponible y, en general, sobre los parámetros económicos del proyecto.

La evaluación de los recursos disponibles de biomasa suele ser sencilla cuando se trata de aprovechar los residuos de alguna industria, cuya producción en cantidad, calidad y tiempo se suelen conocer con bastante exactitud ya que va ligada al proceso productivo de la empresa. Pero, en general, los proyectos con biomasa como combustible suelen implicar la utilización de una variedad de materiales, como los residuos forestales, agrícolas y los cultivos energéticos, cuya producción y disponibilidad está sometida a una serie de factores externos que tienen siempre un carácter local y, además, algunos de ellos varían en importancia y de forma difícilmente previsible en el tiempo. Entre estos factores pueden citarse:

- **Climatología.**- afecta directamente y de forma principal a la producción agrícola y, por tanto, a la cantidad anual de

residuos agrícolas y de biomasa de cultivos energéticos disponible.

- **Orografía.-** afecta fundamentalmente a la cantidad de biomasa residual forestal recolectable. En pendientes superiores al 30% no es posible llevar a cabo la recolección mecanizada de residuos forestales
- **Mercados y tecnologías alternativas.-** la existencia de mercados alternativos para biomásas importantes como es el caso del mercado alimentario para los cereales y las oleaginosas, así como los mercados alternativos para residuos muy importantes como la paja de cereales (que también puede utilizarse para alimentación y cama de ganado, fabricación de cartón y papel, etc.) y los residuos forestales (fabricación de tableros aglomerados), hace que la disponibilidad de estos recursos para su uso energético pueda verse afectada por la situación de competitividad de los mercados alternativos. Asimismo pueden existir posibilidades tecnológicas alternativas competitivas con las energéticas para la utilización de biomásas como los residuos biodegradables, para los que existen también tecnologías alternativas no energéticas de tratamiento.
- **Factores ambientales no climáticos.-** Así, la conservación de la estructura y fertilidad del suelo forestal puede limitar la cantidad de biomasa forestal extraída de una determinada zona.
- **Otros.-** existen diferentes factores, a menudo muy imprevisibles, que pueden determinar la disponibilidad de biomasa a nivel local.

EJEMPLO: Así, los incendios forestales extensos pueden afectar dramáticamente durante largos periodos la cantidad de biomasa residual forestal producida.

De acuerdo a lo expuesto, es muy importante tener presentes las condiciones locales a la hora de llevar a cabo un estudio de evaluación de recursos de la biomasa. En este sentido, se deberá adoptar la máxima cautela a la hora de adoptar índices de producción de biomasa o cualquier otro dato a partir de fuentes bibliográficas, a fin de asegurar que son aplicables a la zona de estudio. En el caso de duda se deben de realizar sobre el terreno estudios experimentales específicos que permitan obtener los datos precisos o al menos, corroborar los existentes en la bibliografía.

En general, se debe disponer de datos estadísticos de la zona de estudio sobre tiempos suficientemente amplios. Una década puede ser un periodo de tiempo mínimo para conocer de forma fiable la producción agrícola media de residuos. Este periodo será mayor para obtener índices fiables medios de producción de residuos forestales.

En los estudios sobre evaluación de recursos de biomasa se debe distinguir siempre entre la biomasa potencial o biomasa total generada en el área de estudio, la biomasa utilizable, o biomasa que técnicamente puede extraerse de forma sostenible y la biomasa disponible de forma sostenible para su uso energético, teniendo en cuenta mercados alternativos y otras limitaciones.

Otro aspecto de gran importancia en este tipo de estudios es la delimitación del área de trabajo. Por razones de los altos costos de recolección, la biomasa presenta, en general, limitaciones en cuanto a las distancias de acopio, de tal forma que para materiales como los residuos forestales y agrícolas, ésta suele estar limitada a un radio no superior a 50-60 km del punto de utilización. Es interesante, además, tener en cuenta el interés

de delimitar la zona por términos municipales o provincias o, en general, unidades administrativas de las que dependan funciones regulatorias de la producción de la biomasa, sobre todo en el caso de la forestal. Con ello lograremos simplificar la futura gestión de acopio de la biomasa. Un criterio puede ser considerar todas las unidades administrativas (términos municipales, por ejemplo) que tengan más de un 50% de su territorio comprendido dentro de la distancia radial considerada.

En definitiva, de lo mencionado en este Capítulo, podemos concluir el gran potencial energético que posee el recurso, potencial aún hoy muy poco utilizado tanto en lo referente a residuos como, fundamentalmente, en lo relativo a los nuevos cultivos energéticos. El incremento de la implantación de la biomasa como recurso endógeno para la producción de energía puede ser un instrumento importante para disminuir la dependencia energética del exterior de muchos países, lo cual sería especialmente importante a corto plazo para los países en vías de desarrollo, que ven sus objetivos de desarrollo comprometidos en gran medida por las altas facturas de los combustibles que deben adquirir para lograr sus objetivos de progreso.

2.4.3. Procesos y Tecnologías de Conversión Energética

1) Descripción General de los Procesos

En los dos apartados anteriores se ha realizado una revisión de la utilización energética de la biomasa a nivel mundial, de los recursos existentes y de su potencial sostenible. En este Capítulo y de acuerdo a los objetivos planteados en el Módulo se describen los principales procesos y tecnologías para la producción de calor y electricidad con biomasa, así como sus aplicaciones en el mercado.

En el esquema de la Figura N° 8 se muestran los procesos para la transformación energética de la biomasa, algunas de las materias primas más importantes utilizadas en cada proceso y sus principales campos de aplicación.

Como puede observarse en dicha figura, atendiendo a la naturaleza del agente que determina el proceso de conversión existen cuatro grupos de procesos básicos relacionados con la conversión energética de la biomasa: físicos, termoquímicos, químicos y biológicos. En realidad tan solo la combustión es un proceso fuertemente ligado a la liberación de energía. El resto de los procesos indicados en la Figura son etapas u operaciones intermedias en las cadenas energéticas de la biomasa cuyo producto final son diferentes productos con valor energético derivados de la biomasa, denominados genéricamente biocombustibles, que terminarán, a su vez, rindiendo energía en procesos de combustión.

Los procesos físicos más importantes, como son la reducción granulométrica (troceado, astillado, molienda) de la biomasa sólida, su secado y densificación, son, como se ha mencionado, etapas intermedias dentro de los procesos globales de transformación energética de esta biomasa (ver Figura N° 8). El objetivo de estos procesos consiste en acondicionar los materiales biomásicos a fin de obtener unos biocombustibles con características adecuadas a las especificaciones requeridas por los equipos de conversión energética.

Además de los procesos mencionados existen otros, como la filtración, concentración, destilación, etc., que se utilizan en distintos procesos de conversión energética de la biomasa, pero que, en general, no conducen a la producción de biocombustibles intermedios como en el caso de los anteriores, por lo que cabe

considerarlos más como simples operaciones que como procesos en sí.

Los procesos termoquímicos (pirólisis, gasificación y combustión) consisten en una descomposición de los componentes orgánicos de la biomasa a altas temperaturas.

Tal como muestra el esquema de la Figura N° 9, pirólisis, gasificación y combustión constituyen en realidad tres etapas en el proceso de degradación y oxidación total térmica de la biomasa. En una primera etapa y en ausencia de oxígeno (pirólisis) se produce un craqueo de la materia orgánica a compuestos más simples, que constituyen los productos orgánicos que integran el denominado "tar". Asimismo, se forman partículas carbonosas que se denominan "char". El "char" constituye el producto principal del proceso pirolítico cuando éste ocurre a las más bajas temperaturas (300-500°C) y en tiempos altos (8 – 30 días). El "char" se denomina entonces carbón vegetal.

En una segunda etapa se produce la gasificación o formación de productos gaseosos (CO, CO₂, H₂, hidrocarburos) a partir de los compuestos de la etapa pirolítica. . Esto ocurre en un ambiente con un contenido en oxígeno inferior al mínimo necesario para producir la combustión u oxidación total de los componentes de la biomasa (oxígeno Estequiométricas).

El producto final principal de esta etapa es el gas de gasificación, que contiene hidrógeno y monóxido de carbono como principales combustibles.

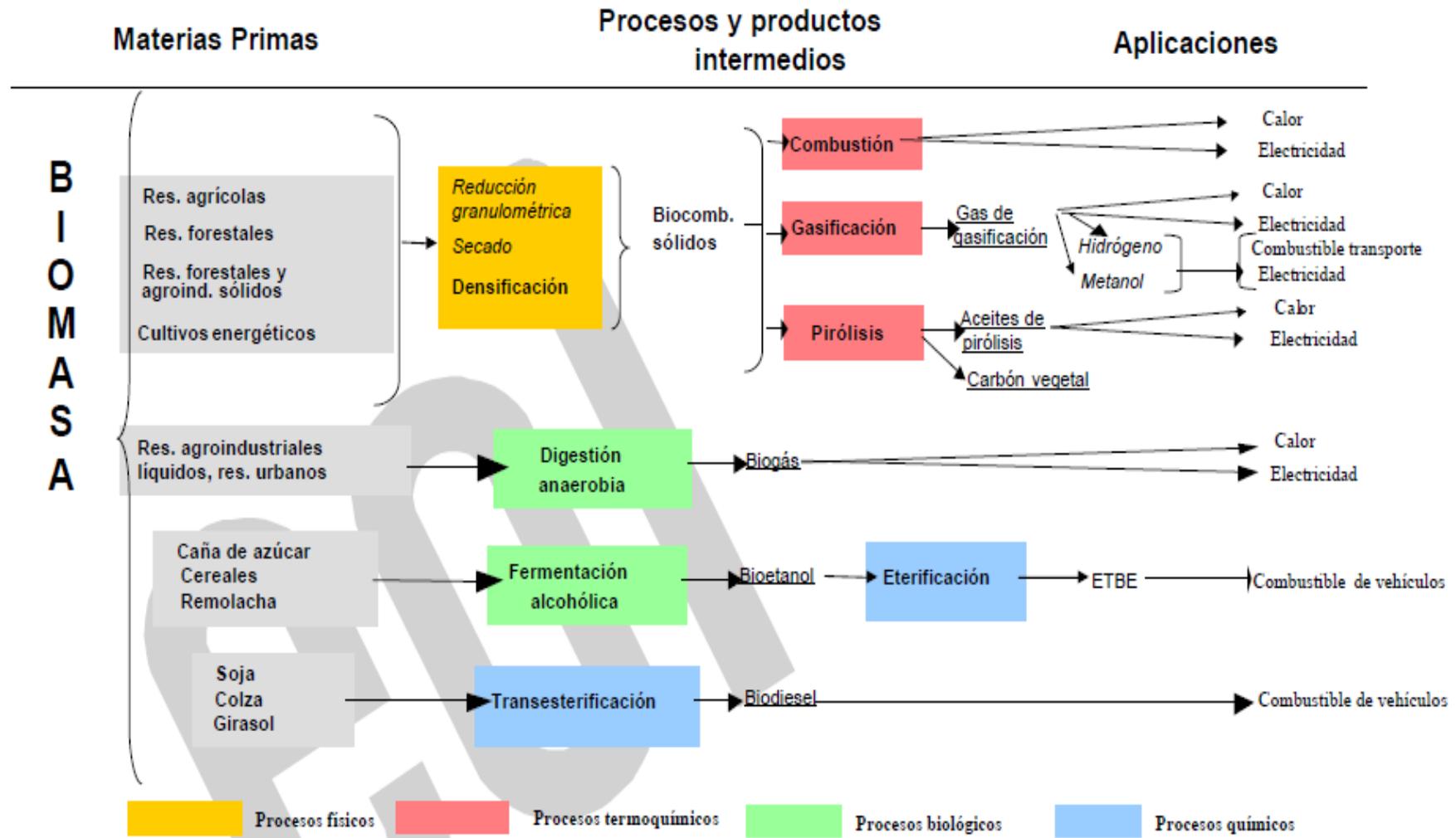
Finalmente, si en el medio existe suficiente oxígeno, se termina produciendo la oxidación total de los compuestos de la etapa de gasificación, incluido el carbono, para dar lugar a CO₂ y agua como

productos de la oxidación total de la materia orgánica, junto con las sales minerales de la biomasa (proceso de combustión).

Dependiendo de la cantidad de oxígeno (aire) presente en el medio de reacción y de la temperatura, el proceso de oxidación de la materia orgánica y de cualquier combustible, en general, queda detenido en una u otra etapa y así hablamos de forma diferenciada de procesos de pirólisis, gasificación o combustión.

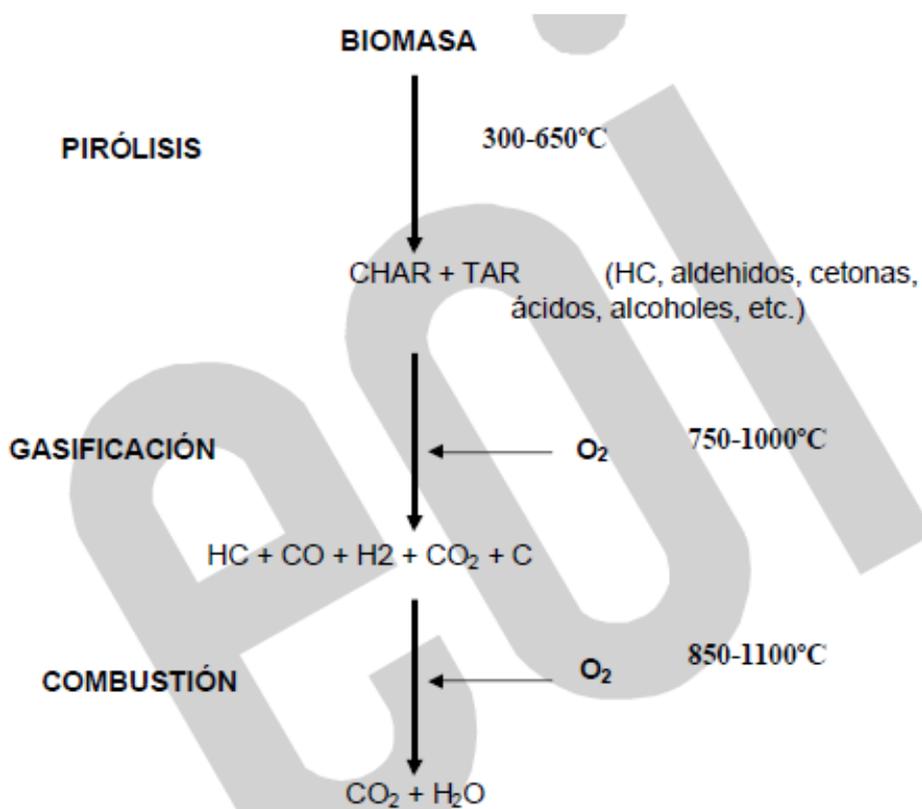
Los procesos biológicos o bioquímicos se producen por la acción de microorganismos o sus enzimas sobre determinadas fracciones de la biomasa. Entre estos procesos pueden citarse como más significativos la fermentación alcohólica para la producción de bioetanol combustible a partir de las fracciones fermentables (azúcares) de la biomasa, y la digestión anaerobia, que es un proceso microbiológico que está fundamentalmente asociado al tratamiento de los residuos biodegradables y cuyo producto final es el denominado biogás que se utiliza como combustible, para la producción de calor y electricidad.

Figura N° 8: Procesos de conversión energética de la biomasa. Materias primas utilizadas y aplicaciones



Finalmente, el cuarto grupo de procesos lo constituyen los de tipo químico, representados, principalmente, por el proceso de transesterificación de aceites vegetales, para la obtención de biodiesel que es un biocombustible líquido de características físicas parecidas al diésel (gasóleo) y cuya aplicación principal es como combustible de vehículos, en sustitución del gasóleo. También cabe mencionar en este grupo al proceso de producción de ETBE (etilterbutileter) a partir del bioetanol y que, como éste, se emplea como combustible de vehículos.

Figura N° 9: Esquema del proceso de descomposición termina de la biomasa



Como puede observarse en la Tabla N° 4, la producción de biocombustibles líquidos para el transporte está asociada a procesos biológicos (fermentación alcohólica) y químicos (transesterificación, producción de ETBE), utilizándose materias primas agrícolas de tipo azucarado o amiláceo en el caso del bioetanol, y oleaginoso, para la producción de biodiesel.

Además, la gasificación de la biomasa, a través de la producción de hidrógeno, metanol y otros Biocarburantes denominados de segunda generación, ofrece alternativas, aunque a largo plazo, dentro de este sector.

Asimismo, la biomasa lignocelulósica puede transformarse en bioetanol mediante hidrólisis ácida (proceso químico) o enzimática (proceso bioquímico) previa a la fermentación de sus componentes celulosa y hemicelulosa.

En la Tabla N° 4 se muestran los rendimientos energéticos finales típicos de la producción de energía mediante los procesos termoquímicos y biológicos indicados. Como puede observarse, los procesos termoquímicos presentan un rendimiento superior a los biológicos debido a que actúan sobre la totalidad de la materia orgánica de la biomasa, mientras que en los segundos la conversión sólo se efectúa sobre determinadas fracciones de la misma, principalmente las fracciones azucaradas.

Tabla N° 4: Datos indicativos sobre eficiencia de diversos procesos de conversión energética de la biomasa.

| PROCESO | Contenido energético (producción energética) respecto al de la biomasa de partida (%) | | |
|-----------------------------------|---|---------|---------------------------------|
| | Combustible intermedio | Calor | Electricidad o trabajo mecánico |
| Combustión | - | 65 – 95 | 20 – 35 |
| Pirolisis lenta (carbonización) * | 70 – 75 | 60 – 70 | 22 – 30 |
| Gasificación ** | 65 – 80 | - | 22 – 27 |
| Digestión anaerobia | 20 – 35 | 18 – 30 | 7 – 12 |
| Fermentación alcohólica | 20 – 30 | - | 5 - 10 |

* proceso semicontinuos o continuos

** en instalaciones pequeñas con motogeneradores.

Es de reseñar que todos los procesos que se muestran en la Tabla han alcanzado un desarrollo comercial, excepto la gasificación que es una tecnología en fase de demostración en su aplicación eléctrica.

2) Procesos Físicos y Termodinámicos.

a) Procesos físicos

Como ya se ha mencionado en el apartado anterior, los principales procesos físicos relacionados con la conversión térmica y eléctrica de la biomasa tienen que ver con la preparación de los biocombustibles sólidos utilizados en estos procesos. Como procesos más importantes en este apartado pueden citarse la reducción granulométrica (cortado, astillado, molienda), secado y la densificación.

- **Cortado o troceado**

Los troncos y ramas más gruesas procedentes de las labores selvícolas constituyen las denominadas leñas que son ampliamente utilizadas en el mundo rural como combustible del sector doméstico.

Al objeto de poder utilizarlas en los equipos de combustión, sobre todo en los de menor tamaño, se hace preciso un proceso de troceado o cortado de esta biomasa que da lugar a la leña de tamaño relativamente grande que se utiliza en estufas, chimeneas y calderas.

Tradicionalmente el corte de la leña se ha realizado a mano. Actualmente, existe maquinaria específicamente diseñada para este fin. En la Figura N° 10 se muestra un equipo de cortado de madera consistente en una sierra que corta los

troncos longitudinalmente haciéndolos pasar impulsados por una prensa hidráulica a través de una matriz cortadora. De esta forma se consiguen unos trozos de leña muy iguales en forma y tamaño, lo que facilita su transporte y almacenaje, así como su empleo estandarizado en chimeneas, estufas y calderas.

Figura N° 10: Cortadora de troncos de madera



- **Astillado**

Como el proceso anterior, consiste en una reducción granulométrica de la biomasa que en este caso llega hasta unas piezas de tamaño 3 - 10 cm de largo que se denominan astillas.

El astillado de la biomasa se realiza mediante equipos denominados astilladoras, que, en general, utilizan como elementos de corte cuchillas en el caso de materiales húmedos y de poco grosor y rodillos con cuchillas para materiales secos o de diámetro importante.

- **Molienda**

Algunos procesos de conversión energética de la biomasa necesitan utilizar partículas de tamaño inferior al de una astilla lo que requiere un proceso previo de reducción granulométrica denominado molienda para conseguir un tamaño de la biomasa inicial inferior a 2 - 3 cm., que constituye el producto final de este proceso.

Los equipos más empleados para efectuar esta operación son molinos de martillos y de tambor en grandes plantas. Estos últimos suponen un mayor coste de inversión, pero tienen un gasto de electricidad no superior al 20% el de aquellos. También se emplean molinos de cuchillas para las biomásas más húmedas.

- **Secado**

Como su propio nombre indica, este proceso consiste en extraer agua de la biomasa a fin de lograr un producto con menor contenido en humedad, de acuerdo a las especificaciones requeridas por los procesos de conversión energética.

- **Secado natural**

La reducción en el contenido en humedad de las biomásas lignocelulósicas húmedas (p.e. contenido de un 40 – 50% de humedad sobre base húmeda) puede lograrse mediante secado natural, aprovechando los fenómenos termogénicos que, fundamentalmente, por acción microbiana, se producen cuando estas biomásas se acumulan en montones. Como consecuencia del calentamiento interior de los montones de biomasa húmeda, se produce una circulación por convección del aire de las proximidades del montón hacia el interior de este y

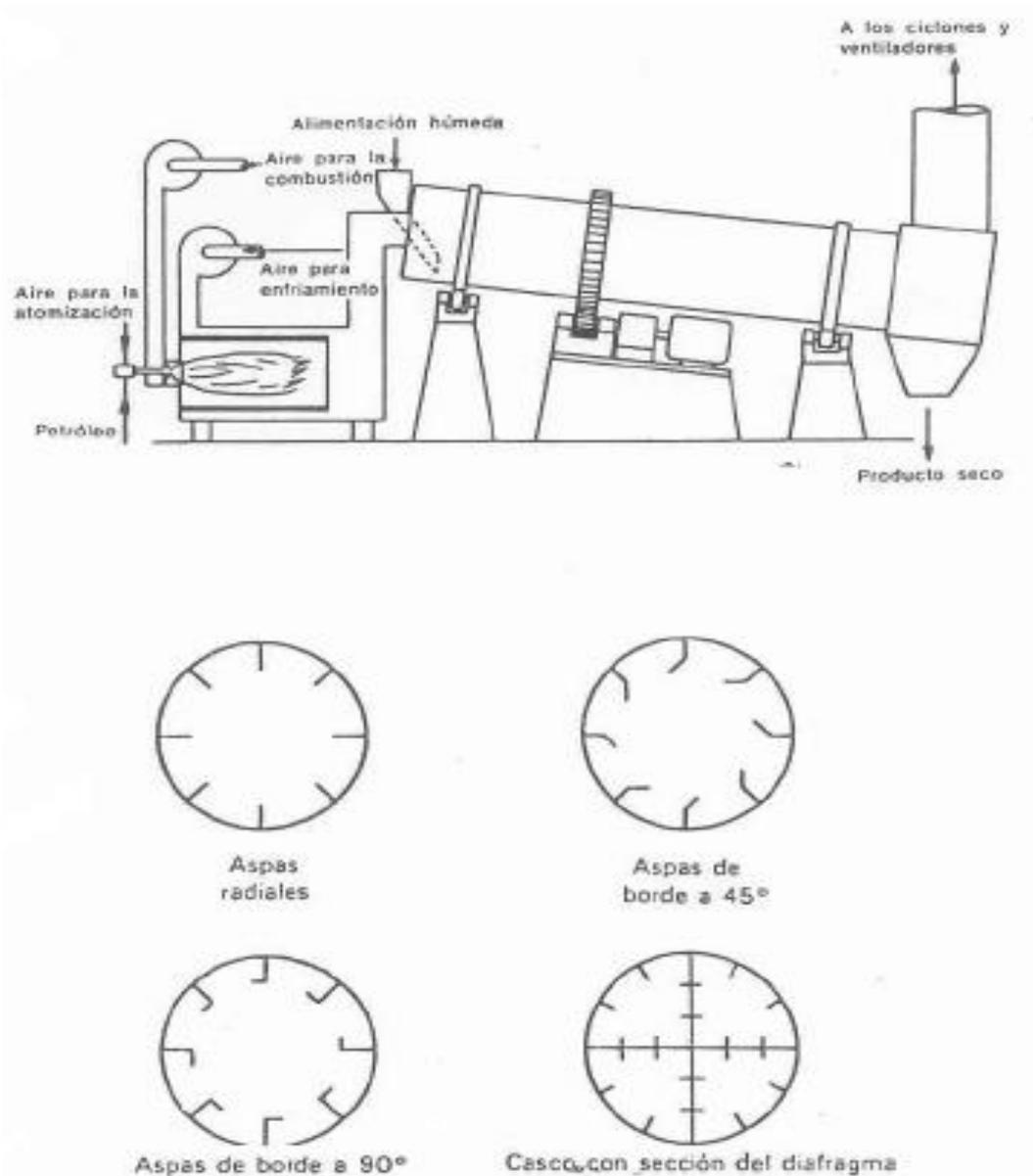
en sentido ascendente en su interior. Al circular por el interior del montón el aire se calienta y se carga de humedad, que cede parcialmente a la biomasa en la cumbre del montón, más fría.

En climas muy húmedos o cuando se hace precisa la obtención de unos productos con un bajo grado de humedad, el proceso de secado se efectúa mediante procedimientos forzados, utilizando aire caliente o vapor o, incluso, energía solar, como agentes secantes.

- **Secado forzado**

Los equipos más utilizados por la industria para el secado de la madera energética son secaderos rotatorios (trommel) (Figura N° 11), en los que se utiliza, por lo general de forma directa, aire caliente o vapor seco como agentes secantes que son producidos específicamente para el proceso o constituyen la energía residual de otros procesos (e.g. cogeneración). Estos equipos disponen de unas aspas interiores continuas que favorecen el avance del material y su mezcla con el agente secante. La eficiencia de estos equipos en condiciones normales de operación suele ser del 60 - 65%, que expresa en porcentaje la cantidad de energía necesaria para extraer en las condiciones de proceso el agua de la biomasa, frente a la energía contenida en el combustible utilizado en la operación.

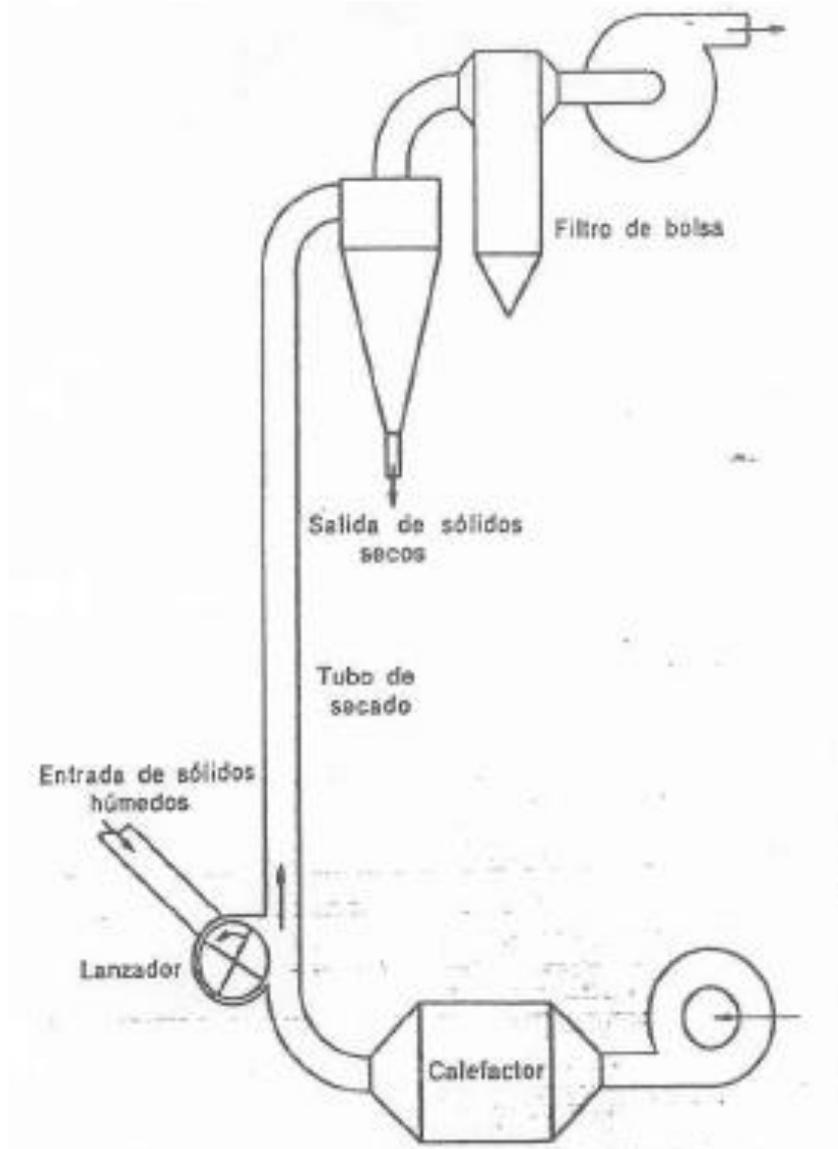
Figura N° 11: Esquema de un secador rotatorio de biomasa y distintos diseños de aspas interiores.



Para biomásas de pequeño tamaño (p.e. serrines de madera) se suelen utilizar secaderos de transporte neumático (Figura N° 12), en los que las partículas se secan en suspensión, en una corriente de aire caliente o vapor seco que se inyecta por la parte inferior del secadero. Cuando una partícula se seca, pesa menos y se arrastra más fácilmente por la corriente secante hasta el ciclón de salida. Estos equipos se suelen utilizar cuando no se

necesita un secado muy importante de la biomasa, siendo especialmente efectivos para reducir en algunos puntos el contenido en humedad de la biomasa. A veces incorporan sistemas de recirculación de partículas, al objeto de incrementar su capacidad secante.

Figura N° 12: Esquema de un secador de transporte neumático de biomasa.



También se utilizan para el secado de la biomasa los secaderos de bandas y los de lecho fluidizado. Los primeros consisten en unas cintas o bandas perforadas sobre las que se deposita la biomasa, haciéndose circular en sentido

perpendicular a la cinta, aire caliente que actúa de agente secante. El tiempo de residencia de la biomasa sobre la cinta en movimiento y el flujo y temperatura del aire secante determinan los resultados del secado. Estos secaderos presentan unos costes de inversión y mantenimiento inferiores a los trommeles. Aunque su rendimiento energético es menor utilizan aire a menor temperatura que aquellos.

- **Densificación**

Consiste en una compactación de las partículas de biomasa someténdolas a altas presiones, para dar lugar a unos biocombustibles sólidos derivados denominados pélets y briquetas.

Estos productos se diferencian entre sí por su tamaño, estando los pélets constituidos por piezas de tamaño homogéneo, generalmente cilíndricas, de 3 a 12 mm de diámetro y algunos centímetros de largo, y siendo las briquetas piezas de forma cilíndrica, a veces poliédrica, de 5 a 15 centímetros de diámetro y 30 - 40 cm de largo.

Además de su forma regular, los pélets y briquetas de biomasa tienen una densidad específica de 1,1 - 1.3 kg/dm³, y una densidad aparente en torno a 0.6-0.7 Kg/dm³ lo que junto a su bajo grado de humedad (igual o inferior al 10%) les convierte en unos biocombustibles de fácil manejo y de inferiores costes de transporte y almacenaje en relación con la biomasa bruta (Tabla N° 5). Los pélets son además aptos para su alimentación automática a calderas. Todo ello hace de estos productos unos combustibles de una calidad muy superior a la de las biomásas que se emplean como materias primas en su fabricación.

Tabla N° 5: Valores analíticos típicos de la madera de pino pélets de serrines de pino y carbón mineral.

| Características | Astilla de pino | Pelet de astilla de pino | Carbón (hulla) |
|--|------------------------|---------------------------------|-----------------------|
| Densidad de pila (kg/m ³) | 0.3 – 0.4 | 0.6 – 0.7 | Aprox 1 |
| Densidad aparente (kg/m ³) | n.d. | 1.2 – 1.3 | n.d. |
| Humedad (% b.h.) | 30 – 50 | ≤ 10 | ≤ 15 |
| PCI (MJ/kg) | 10 – 12 | 18 | 24 |

n.d. no disponible B.h. – base húmeda PCI – poder calorífico inferior

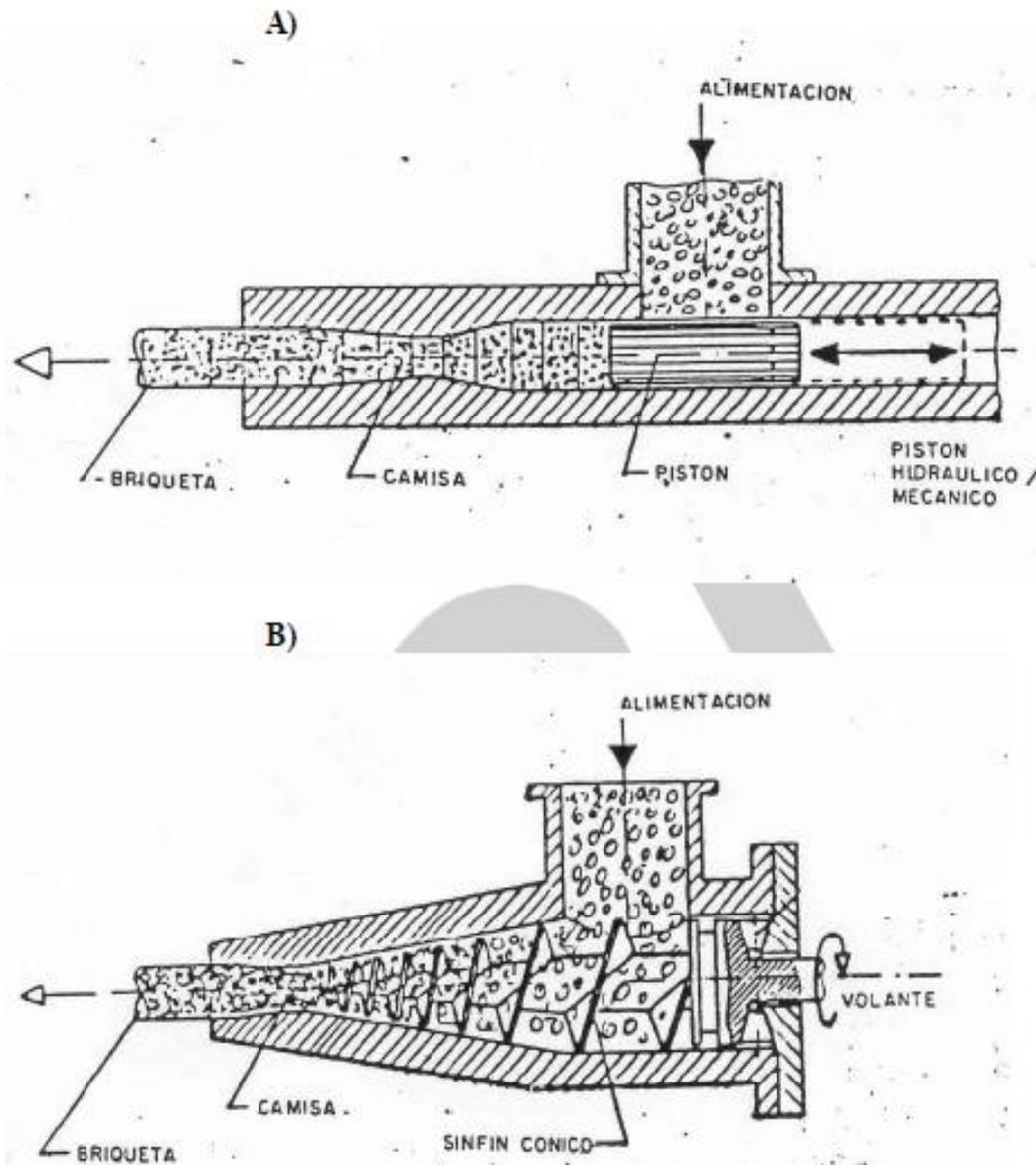
Como se acaba de mencionar, el proceso de densificación de biomasa consiste en someter a altas presiones a las partículas de biomasa, produciéndose de esta forma su unión íntima. Para que este proceso se lleve a cabo adecuadamente es preciso que las partículas de biomasa sean de pequeño tamaño, 1cm como máximo, y que tengan un contenido máximo de humedad del 15%, lo que frecuentemente exige el desarrollo de procesos de molienda y/o secado de la biomasa original. A veces se utilizan aditivos para favorecer la unión de las partículas, pero cuando el proceso se lleva a cabo correctamente estos agentes no suelen ser necesarios ya que a las altas temperaturas que se alcanzan en las cámaras de compactación (250 – 300°C), los componentes hemicelulosa y lignina de la biomasa se funden y actúan de colas naturales.

En la producción de briquetas se utilizan máquinas compactadoras que pueden ser prensas hidráulicas, o de pistón o equipos extrusores (Figura N° 13). Las prensas hidráulicas rinden productos de menor densidad y calidad, en torno a 1 kg/m³. Las máquinas extrusoras pueden en determinados casos llegar a producir pelets de mayor

densidad que las prensas de pistón, pero sus costes de inversión y mantenimiento son más altos, lo cual ha determinado que la mayor parte de las briquetadoras en el mercado sean finalmente de pistón.

Figura N° 13: Esquema de briquetadoras de biomasa.

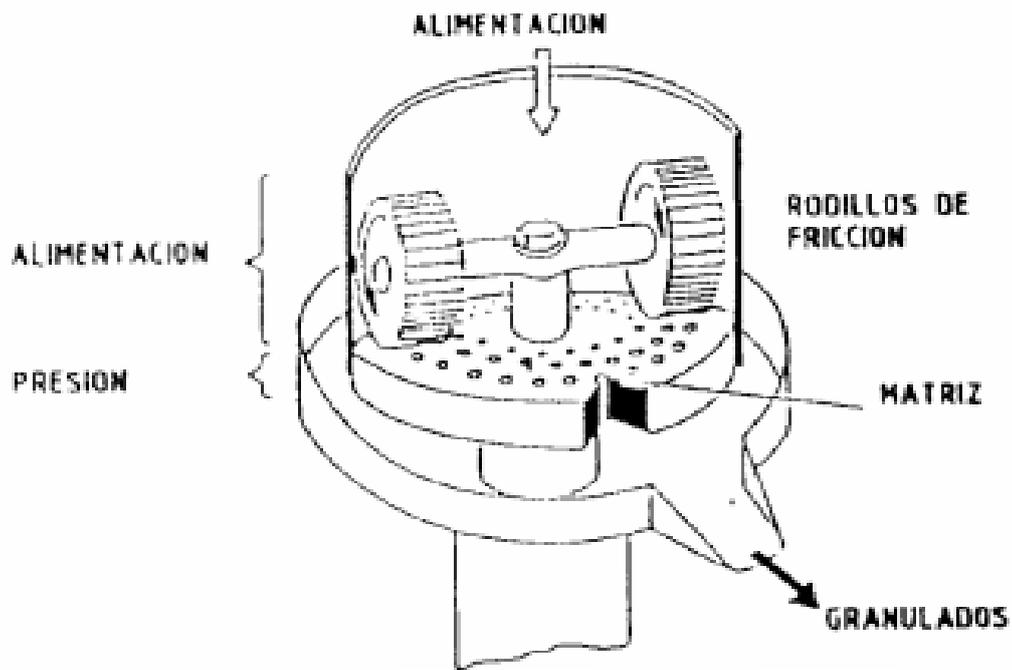
A) de tipo pistón; B) de extrusión.



Por su parte, la producción de pelets se lleva a cabo en granuladoras como la que se muestra en esquema en la Figura N° 14. Estos equipos son semejantes a los de

fabricación de piensos granulados para piensos animales. Pueden tener una matriz horizontal o anular, dependiendo, entre otros factores, de las características del material a peletizar.

Figura N° 14: Esquema de una maquina peletizadora de biomasa de matriz plana.



b) Procesos termoquímicos

- **Pirólisis**

La pirólisis consiste en una descomposición térmica de la biomasa en ausencia de oxígeno y que rinde como producto principal el denominado carbón vegetal, cuando se realiza a temperaturas relativamente bajas (inferiores a 350°C) y tiempos largos, hasta de muchos días, si se utilizan las tecnologías tradicionales. Este proceso se conoce también con el nombre de carbonización.

El carbón vegetal, con un poder calorífico de 20-25MJ/kg, superior al de la biomasa, ha sido tradicionalmente utilizado y hoy en día lo es aún en muchos países en vías de desarrollo, como combustible de calefacción doméstica. Su uso en equipos de combustión, incluso rudimentarios, produce menos emisiones que la biomasa original y su transporte es más fácil, por lo que se tratando de promover su producción y uso energético en muchos países africanos como alternativa ventajosa y de producción relativamente poco costosa, en sustitución de la leña tradicional.

Como se ha mencionado en el apartado anterior, existe también en desarrollo una pirólisis rápida de la biomasa que rinde como productos principales los denominados aceites de pirolisis, con aplicaciones potenciales como combustibles para la generación eléctrica y en el sector transporte. Este proceso será descrito con mayor detalle en un capítulo posterior.

La tecnología de carbonización más clásica es la de pilas de biomasa o carboneras, que se recubren con tierra para evitar la entrada de aire y a las que se practican unas lumbreras o entradas de aire en su parte inferior que sirven para iniciar una combustión interna inicial de las pilas y elevar su temperatura hasta la de pirólisis. A continuación, se tapan estas entradas y se inicia la carbonización, que puede durar hasta 40 días. Esta tecnología tiene un rendimiento muy bajo, precisándose de 10 a 15 kg de biomasa para la obtención de 1 kg de carbón vegetal. Además es muy contaminante, debido a la gran cantidad de gases de pirólisis que escapan a la atmósfera y de lixiviados que pueden contaminar el suelo y el agua.

Además de las carboneras clásicas, se han desarrollado en diferentes países con tradición de carboneo una gran variedad de hornos discontinuos y existen también tecnologías más avanzadas semicontinuas o de proceso continuo. Entre las primeras puede citarse como ya tradicional y de uso muy extendido la tecnología Lambiotte. Con esta última tecnología se obtienen rendimientos de 1 kg de carbón vegetal por cada 2 – 2.5 kg de biomasa en un tiempo de residencia en el reactor de 8 – 12 horas. Los gases del proceso son reciclados al interior del horno para mantener la temperatura del mismo y los lixiviados son recogidos y tratados adecuadamente, evitando su dispersión al medio. El rendimiento energético de esta tecnología está en torno al 70%, medida como el equivalente energético del carbón vegetal frente al de la biomasa utilizada en su obtención.

- **Gasificación.**

La gasificación es un proceso que, como la combustión, se lleva a cabo a altas temperaturas (700 y 1200 °C) y en presencia de aire, pero, a diferencia de la combustión (ver siguiente punto), la cantidad de aire empleado está por debajo del aire Estequiométrica o aire necesario para producir la oxidación total de la biomasa tratada. De esta forma la gasificación puede definirse como un proceso de combustión incompleta del que, como producto principal, se obtiene un gas combustible compuesto por nitrógeno, hidrógeno, metano y monóxido de carbono como productos principales.

El proceso de gasificación involucra un gran número de reacciones químicas, que se inician con un craqueo o descomposición de los componentes de la materia orgánica

mediante pirólisis, para posteriormente irse oxidando parcialmente los productos de pirólisis a otros más simples y, a su vez, se producen un gran número de reacciones entre el carbono de la biomasa, el agua presente en el proceso procedente de la biomasa y los productos intermediarios del proceso, como el hidrógeno, monóxido de carbono, metano etc. La Figura N° 15 muestra algunas de estas reacciones cuyo número total supera las doscientas.

Muchas de las reacciones de gasificación están desplazadas, en las condiciones en que se lleva a cabo el proceso, en su sentido endotérmico, es decir que precisan de un aporte energético. En otros casos, son, por el contrario, reacciones exotérmicas. De esta forma, la gasificación de la biomasa es, globalmente, un proceso energéticamente automantenido y, a veces, dependiendo del contenido en agua de la materia prima y de las condiciones del proceso, puede necesitar un aporte energético externo.

Figura N° 15: Reacciones de gasificación de la biomasa.

| | | |
|---------------------|---|---|
| Biomasa + Calor | → | Carbono (residuo)+Líquidos +Gases (CO,H ₂ , CH ₄ etc) |
| Líquidos + Calor | → | Gases |
| C+H ₂ O | ↔ | CO+H ₂ +130.2MJ |
| C+2H ₂ | ↔ | CH ₄ -74.9MJ |
| C+CO ₂ | ↔ | 2CO+170MJ |
| 2C+O ₂ | ↔ | 2CO-22.8MJ |
| 2CO+O ₂ | ↔ | 2CO ₂ -564MJ |
| CO+H ₂ O | ↔ | CO ₂ +H ₂ -40.67MJ |
| CO+3H ₂ | ↔ | CH ₄ H ₂ O-206.2MJ |

La composición del gas obtenido en cada proceso dependerá del estado de equilibrio logrado en las múltiples

reacciones del proceso, el cual, para un determinado biocombustible, dependerá a su vez de factores como la temperatura, presión, presencia de catalizadores etc.

Los procesos convencionales de gasificación utilizan aire como agente gasificante, si bien en ocasiones emplean aire enriquecido en oxígeno, lo que determina un aumento del poder calorífico del gas resultante por efecto de concentración de los compuestos combustibles, al disminuir el contenido de nitrógeno. Mediante procesos catalíticos y con empleo de vapor de agua para favorecer la reacción de Schiff (Figura N° 15) es posible enriquecer en hidrógeno el gas resultante (gas de síntesis), que tiene aplicaciones en la producción de hidrógeno y metanol de metanol.

En la Tabla N° 6 se indica la composición típica del gas de gasificación de biomasa obtenido con una tecnología de lecho móvil con aire. Como puede observarse, es un gas pobre, de bajo poder calorífico, en torno a 4-6 MJ/Nm³, constituido principalmente por monóxido de carbono, hidrógeno y nitrógeno. Además, entran también a formar parte de su composición productos secundarios resultantes del proceso, como alquitranes (tar), partículas carbonosa (char) y partículas minerales (cenizas), cuya presencia es indeseable para la utilización energética posterior de dicho gas.

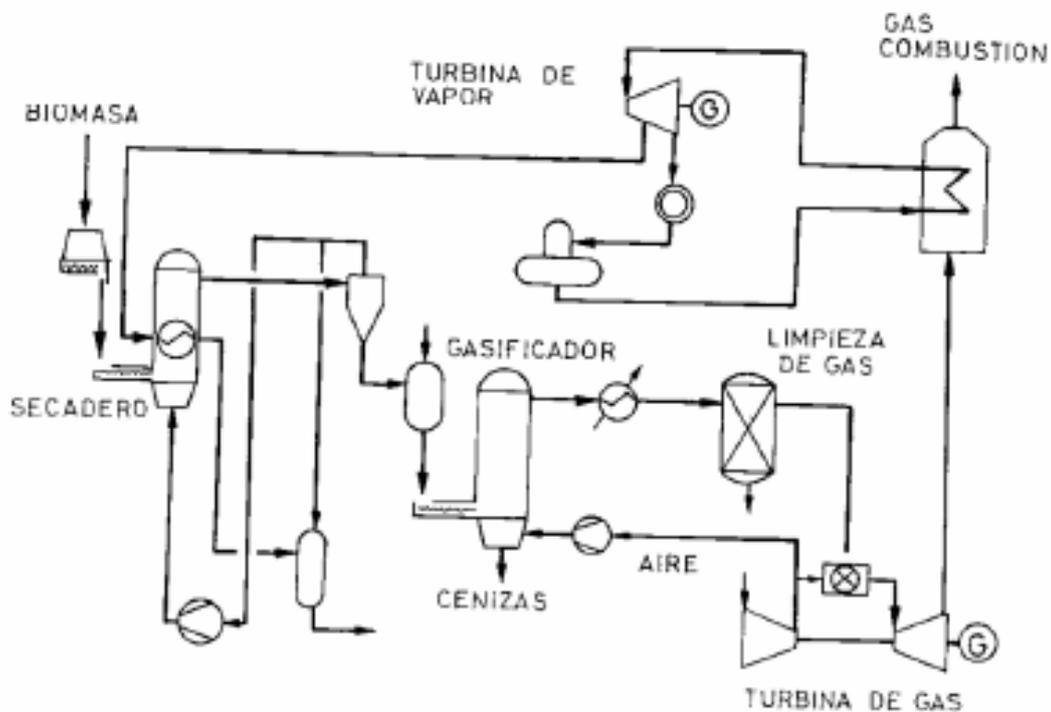
Tabla N° 6: Composición indicativa del gas de gasificación con aire de biomasa.

| COMPONENTE | CONTENIDO (%vol) |
|---------------------------------------|--------------------------|
| Nitrógeno (N ₂) | 35 – 45 |
| Monóxido de carbono (CO) | 15 – 25 |
| Dióxido de carbono (CO ₂) | 6 – 17 |
| Hidrogeno (H ₂) | 15 – 20 |
| Metano (CH ₄) | 1 – 3 |
| Agua vapor (H ₂ O) | 5 – 10 |
| Poder calorífico | 4 – 6 MJ/Nm ³ |

El gas de gasificación de biomasa es un combustible que puede tener determinadas aplicaciones térmicas en las que el uso de gases de combustión no es factible. Este es el caso, por ejemplo, del secado de la cerámica. Sin embargo, su principal aplicación es como combustible en motores y turbinas de generación eléctrica, tanto en pequeños como en grandes sistemas, con aplicaciones en este último caso, en ciclos combinados de generación eléctrica de alto rendimiento (previsto en torno a 42 – 48% de eficiencia neta) (Figura N° 16).

Estos ciclos contemplan la utilización del calor residual de la turbina de gas o del motor generador en una caldera de recuperación, para la producción de vapor, que se utiliza para la obtención de electricidad en una turbina de gas. A veces, los ciclos combinados pueden incluir un ciclo de cogeneración, en el que se utiliza el calor residual de la turbina de vapor.

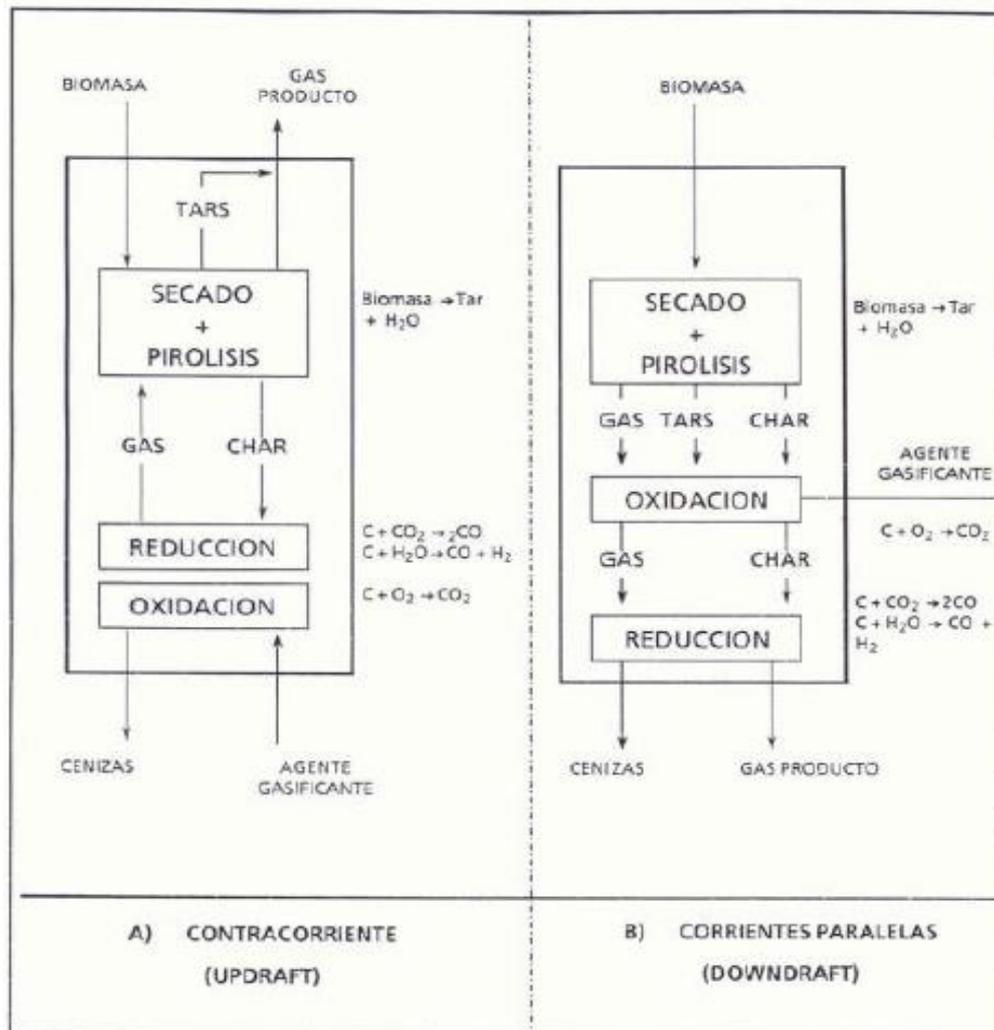
Figura N° 16: Esquema de ciclo combinado para generación eléctrica con turbina de gas de biomasa (BIG-CC).



En lo referente a tecnologías, en sistemas de pequeño y mediano tamaño, la gasificación de la biomasa se lleva a cabo en reactores de lecho fijo, generalmente con una parrilla móvil giratoria en su parte inferior. Dependiendo del sentido de la corriente del agente gasificante con respecto a la circulación de la biomasa en el interior del reactor, estos gasificadores podrán ser de lecho móvil a contracorriente o en corrientes paralelas. En ellos se distinguen cinco zonas diferenciadas: zona de secado, de combustión, de reducción, de pirólisis y de gasificación, en cada una de las cuales tienen lugar etapas diferentes del proceso global. En el esquema de la Figura N° 17 se muestran estas zonas y las reacciones más importantes que en ellas ocurren, en los dos tipos de gasificadores mencionados.

Los gasificadores de lecho móvil en corrientes paralelas son los que producen un gas más limpio, con menor contenido en alquitranes y partículas carbonosas, debido a que el flujo de gases de pirólisis pasa a través de la zona de combustión (Figura N° 17) dónde se eliminan la mayor parte de estos productos, pero tienen limitaciones en su proceso de escalado debido al fuerte gradiente radial que presentan, por lo que su capacidad máxima queda limitada a alrededor de 1 MW. Por el contrario, los de contracorriente en los que el gas producido es muy sucio, pueden ser escalados hasta tamaños muchos mayores, en torno a los 10 MW.

Figura 17: Esquema de gasificadores de biomasa de lecho móvil: A) a contracorriente (updraft), B) de corriente paralelas (downdraft).



Para gasificadores de biomasa de gran tamaño, la tecnología más desarrollada es la de lecho fluidizado, tanto burbujeante como circulante.

La gasificación de biomasa en su conjunto puede considerarse en fase pre comercial en sus aspectos térmicos y para la producción eléctrica en pequeños sistemas de gasificadores de lecho móvil en corrientes paralelas, y en fase de demostración para la generación eléctrica en medianas y grandes plantas. El principal problema aún sin resolver satisfactoriamente de la gasificación de biomasa como tecnología para la generación eléctrica es la limpieza del gas resultante del proceso de las impurezas que lo acompañan (tar, char y partículas minerales, principalmente las de tipo álcali). Como se ha mencionado, los pequeños gasificadores de lecho móvil en corrientes paralelas son los que producen un gas más limpio, de características más próximas a las exigidas por los equipos de generación. (Tabla N° 7), y constituyen la única tecnología de gasificación que puede considerarse en fase precomercial para la generación eléctrica.

Tabla N° 7: Tipo de gasificación y especificaciones.

| Componentes | Tipo de gasificación | | | Especificaciones | |
|-------------|------------------------------|----------------------------|------------------|------------------|---------|
| | Lecho fijo corrientes paral. | Leche fijo contracorriente | Lecho fluidizado | Turbinas de gas | Motores |
| Alquitranes | 40 – 300 | 15000 – 100000 | 2.000 – 15000 | < 8 | 10.50 |
| Partículas | 100 – 6000 | 100 – 1000 | 10000 – 100000 | 10 – 50 | 2 - 50 |

La gasificación de biomasa es un proceso ya desarrollado desde el siglo XIX, pero, en particular, en los últimos veinte años se ha realizado un gran esfuerzo a nivel mundial para

desarrollar y demostrar esta tecnología, sobre todo en sus aplicaciones eléctricas. En la tabla N° 8 se recogen algunos de los proyectos de demostración de gasificación con biomasa más relevantes que se están llevando a cabo a escala mundial en estos momentos.

Como puede observarse, en la mayor parte de los proyectos se utilizan reactores de lecho móvil en corrientes paralelas, que producen el gas más limpio, o bien de lecho fluidizado, tanto a presión, como en las plantas de Burlington y Värnamo (Figura N° 18). o atmosféricos, como en el proyecto ARBRE. En algunos casos se desarrollan opciones con reactores de lecho móvil a contracorriente que, aunque producen un gas muy sucio, presentan las ventajas de la simplicidad de su diseño, menores costos de inversión y sus mayores posibilidades de escalado, frente a los gasificadores de lecho móvil en corrientes paralelas.

Figura N° 18: Planta de demostración BIGCC en Vamamo (Finlandia 7 MWe)



Tabla N° 8. Instalaciones de demostración de gasificación de biomasa

| LOCALIZACION | ESTADO A FINAL DE 2001 | TECNOLOGIA GASIFICACION | POTENCIA MWe | LIMPIEZA ALQUITRANES | LIMPIEZA PARTICULAS | CONSTRUCTOR/ TECNOLOGIA |
|----------------------|--|----------------------------------|--------------|----------------------|---------------------|-------------------------|
| Haarbore (Dinamarca) | > 1000h operación desde 2000. Desarrollo sistema | Lecho móvil contracorriente | 1,5 | Reactor catalítico | Electrofiltro | VOLUND |
| Regal, Bélgica | En operación en granja. > 3000 h/año | Lecho móvil corrientes paralelas | 0,3 | No disponible | No disponible | Xylowatt |
| Eckenfor de Alemania | En operación desde 2001 | Lecho móvil corrientes paralelas | 0,18 | No disponible | No disponible | EVN |
| Austria | Varios en operación | Lecho móvil corrientes paralelas | 0,05 | No disponible | No disponible | Grübl |
| Siebenlehn, Alemania | Operación | Lecho fijo – GICC | 2,3 | No disponible | No disponible | Pipeline Systems |
| Londonderry, Irlanda | 15.000 h operación | Lecho móvil corrientes paralelas | 0,1 | No disponible | No disponible | Rural Generation Ltd. |
| B. Valley, Irlanda | > 1000 h operación | Lecho móvil corrientes paralelas | 0,2 | No disponible | No disponible | B9 Energy Biomass Ltd. |
| Herning, Dinamarca | > 7000 h operación | Lecho móvil corrientes paralelas | 0,4 | No disponible | No disponible | Martezo, modificado |
| Spietz, Suiza | Operación | Lecho móvil corrientes paralelas | 0,2 | No disponible | No disponible | Pyroforce |
| Bladel, Holanda | Construcción | Lecho móvil contracorriente | 3,8 | No disponible | No disponible | PRM Energy Systems |

| LOCALIZACION | ESTADO A FINAL DE 2001 | TECNOLOGIA GASIFICACION | POTENCIA MWe | LIMPIEZA ALQUITRANES | LIMPIEZA PARTICULAS | CONSTRUCTOR/ TECNOLOGIA |
|---------------------|------------------------|---|--------------|---------------------------------|------------------------------------|-------------------------|
| Hengelo, Holanda | Operación desde 2001 | Lecho móvil corrientes paralelas | 0,2 | No disponible | No disponible | HoSt |
| Graz, Austria | Operación desde 2001 | Lecho móvil contracorriente atm | 2 | Combustión, directa | Ciclón + filtro a alta temperatura | VOLUND |
| State Bahía, Brasil | Construcción | ABFB – GICC | 30 | Dolomita | Filtro mangas / scrubber | TPS |
| Burlington, VE, USA | Puesta en marcha | Calor directo atm – Gasif./GT | 15 MWth | A determinar | A determinar | Batelle Columbus |
| Hawái, USA | Operación gasificación | PBFB-GICC/metanol | 5 | Reactor catalítico | Filtro cerámico | RENUGAS |
| Varnamo, Suecia | Parado desde 2000 | PCFB-GICC | 7 | Craqueo a alta temp. (lecho) | Filtro cerámico | FOSTER WHEELER |
| Valle Aire, UK | Diseño | ACFB-GICC | 9 | Reactor catalítico con dolomita | Filtro mangas / scrubber | TPS |
| Di Cascina, Italia | Diseño | ACFB-GICC | | Scrubber agua | Filtro mangas | LURGI |
| Lahti (Finlandia) | Operación | PCFB. Gas a caldera a presión de carbón | 60 MWth | No aplica | No aplica | FOSTER WHEELER |
| Bruselas (Bélgica) | En construcción | ABFB – Ciclo indirecto aire | | Combustión directa | Ciclón | DINAMEC |

- **Combustión**

La combustión es un proceso por el que la biomasa directamente o sus biocombustibles derivados son oxidados hasta dióxido de carbono (CO_2), agua. La ecuación global de la reacción de combustión es la inversa de la de fotosíntesis. El proceso se realiza a altas temperaturas ($800^\circ\text{-}1000^\circ\text{C}$), utilizando aire como agente oxidante e involucra una etapa instantánea inicial de pirólisis y otra de gasificación de la biomasa previas a la de combustión propiamente dicha.

En la combustión en condiciones reales se emplea una cantidad de aire por encima del mínimo necesario que se calcula teóricamente para efectuar la oxidación total del biocombustible que se utilice en cada caso (aire Estequiométricas). En general, el término “combustión de biomasa” suele hacer referencia a la combustión directa de la biomasa o de los biocombustibles sólidos.

La combustión de la biomasa transcurre con liberación de energía en forma de calor y los productos principales resultantes, como se ha mencionado, son el dióxido de carbono, agua (en forma de vapor a la salida de equipo de combustión) y las sales minerales contenidas en la biomasa empleada como combustible, además de relativamente pequeñas cantidades de óxidos de nitrógeno y de azufre, así como de monóxido de carbono, partículas de carbono y otros productos orgánicos (hidrocarburos) resultantes de la combustión incompleta de la biomasa, denominados genéricamente “inquemados”. Las sales minerales junto con inquemados en muy pequeñas cantidades constituyen las cenizas del proceso que, bajo determinadas condiciones, pueden ser, en general, restituidas al suelo

como fertilizantes. El resto de los productos secundarios mencionados constituyen las emisiones gaseosas del proceso cuya minimización es necesaria a fin de disminuir el impacto ambiental producido por este proceso.

La tecnología más difundida a escala comercial para llevar a cabo la combustión de la biomasa es la tradicional de parrilla, utilizándose tanto parrillas fijas, horizontales e inclinadas, como móviles y vibratorias, a veces refrigeradas con agua. Las calderas de parrilla de biomasa no son diferentes en esencia a las utilizadas con otros combustibles sólidos, como el carbón, si bien incorporan modificaciones importantes de diseño al objeto de adaptarlas a las características específicas del nuevo combustible. Para mejor entender este aspecto, es interesante tener en cuenta las características que presenta la biomasa sólida como combustible. En este sentido, en la Tabla N° 9 se muestra la composición de diferentes biomasa de amplia utilización, frente a un carbón de buena calidad (hulla). Las cifras dadas en la tabla son meramente orientativas ya que la composición de una determinada biomasa puede variar con factores tales como la variedad de la especie considerada, las condiciones de cultivo y recolección, la climatología y composición del suelo etc., si bien son representativas de determinadas características que se comentan a continuación.

Tabla N° 9: Composición y características físico – químicas típicas de diferentes biomásas frente al carbón.

| Parámetro | Astilla forestal de pino | Orujillo de aceituna | Paja de cebada (paca) | Cáscara de arroz | Carbón Colombiano (hulla) |
|--|--------------------------|----------------------|-----------------------|------------------|---------------------------|
| Densidad de pila (kg/dm ³) | 0,4 | 0,8 | 0,15 | = 0,1 | Aprox. 1 |
| Poder calorífico PCI (MJ/kg) (b.h) | 12 – 14 | 18 – 20 | 14 – 15 | | 28 |
| Volátiles (b.s.) | 76 | 78 | 76 | 72 | 34 |
| Cenizas (815 °C) (b.s.) | 3,8 | 3,1 | 5 | 12 | 14 |
| K | 0,2 | 0,8 | 0,9 | 0,3 | - |
| Ca | 0,3 | 0,1 | 0,4 | 0,2 | - |
| Ca/K | 1,5 | 0,12 | 0,18 | 0,67 | |
| Análisis elemental (b.s) | | | | | |
| C | 41 | 50 | 45 | 44 | 72 |
| H | 6 | 6,5 | 6,2 | 6 | 4,8 |
| N | 0,4 | 1,7 | 0,5 | 0,4 | 1,3 |
| S | 0,05 | 0,04 | 0,08 | 0,07 | 0,8 |
| Cl | 0,08 | 0,1 | 1,1 | 0,06 | 0,08 |
| Humedad (b.h.) | 30 – 50 | 10 – 15 | 10 – 15 | 8 – 10 | = 15 |

b.s. – base seca

b.h. – base húmeda

En primer lugar y como puede verse en la Tabla N° 9, la biomasa presenta un densidad de pila inferior, por lo general, entre tres a seis veces la del carbón y un poder calorífico unas dos veces inferior, lo que determina que su densidad energética sea de seis y hasta unas quince veces inferior a la del carbón.

Por otra parte, los materiales biomásicos presentan, en general, un contenido en cenizas muy inferior al carbón. Éste es mayor en los materiales herbáceos (paja de cereales, cáscara de arroz) que en los leñosos (astilla de pino), sobrepasando en los primeros frecuentemente el 10% del peso seco de su biomasa.

Un inconveniente importante que presentan las cenizas de la biomasa y, en particular, las de los materiales herbáceos y algunos residuos agroindustriales, es su alto contenido en álcalis, potasio principalmente y una baja relación Ca/K. Esta circunstancia se asocia a la formación durante la combustión de compuestos eutécticos de bajo punto de fusión, que se volatilizan y terminan formando aglomerados en el hogar de los combustores o depósitos en las partes más frías de los mismos (intercambiadores) causando importantes problemas de funcionamiento, tales como una disminución considerable de la eficiencia de los intercambiadores o la discontinuidad del lecho de combustión, en el caso de las calderas de lecho fluidizado. A éstos hay que añadir al menor tamaño de las partículas volantes que se forman durante la combustión de la biomasa en relación al carbón, lo que favorece que parte de ellas choquen con las superficies interiores de los combustores y queden, asimismo, pegadas a los citados depósitos, agravando más aún este problema. Por otra parte, como se observa en la Tabla N° 9, las biomásas herbáceas poseen un mayor contenido en cloro que las leñosas, de lo que se derivan en muchos casos fenómenos de corrosión en los equipos de combustión.

Como consecuencia de estas características de la biomasa, los equipos de combustión de biomasa difieren, fundamentalmente, de los de carbón en las siguientes especificaciones:

1. Las calderas de carbón, cuando poseen alimentación automática, ésta suele realizarse mediante descarga por gravedad del combustible. En cambio, en el caso de la biomasa, debido a su menor densidad y a su

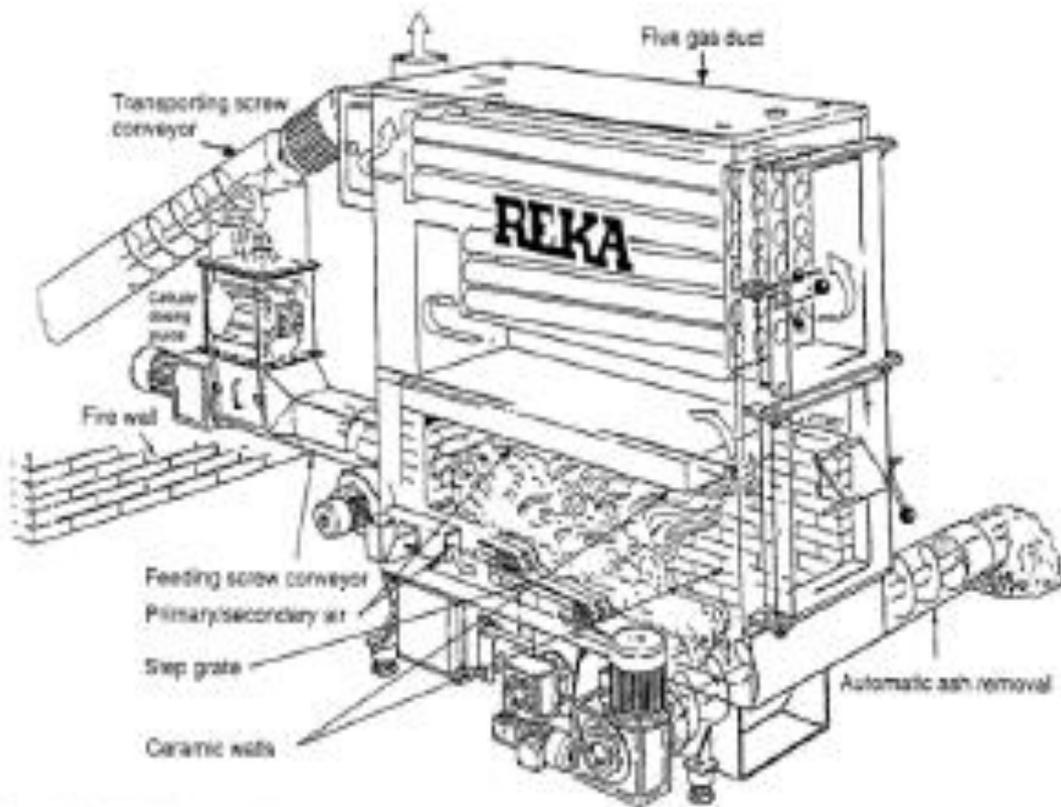
característica geológica, el anterior sistema no es viable y se emplean otros procedimientos, entre los cuales los más generalizados son el de tornillos y, para biomasa de pequeña granulometría, los sistemas neumáticos.

2. Debido a la muy inferior densidad energética de la biomasa, el tamaño específico de los equipos de combustión (volumen de los equipos/cantidad de combustible quemado por unidad de tiempo) de biomasa es, en general, mayor que los de carbón, lo que aumenta los costos de inversión de las instalaciones.
3. La superficie específica de parrilla es inferior en el caso de los equipos de biomasa, debido a que la mayor parte de la biomasa la constituyen los compuestos volátiles que se queman en la zona I del combustor superior a la parrilla (freeboard) y no sobre esta, como ocurre con el carbón.
4. Asimismo, el mayor contenido en compuestos volátiles de la biomasa obliga a introducir modificaciones en la geometría de la cámara de combustión de la caldera, en la distribución aire/combustible y en los sistemas de intercambio. Así, la distancia entre el punto de entrada del combustible y la salida de gases es mayor en los equipos de biomasa, a fin de producir una combustión completa de los volátiles, lo que de no producirse, daría lugar a pérdidas de eficiencia y mayores niveles de emisiones. Por este mismo motivo, los equipos de combustión de biomasa, a diferencia de los de carbón (excepto los que queman carbones con alto contenido en volátiles) poseen en la parte superior libre del combustor diferentes puntos de introducción de aire secundario, a fin de quemar en esta zona los volátiles.
5. Debido a la mayor formación de depósitos en la combustión de las biomasa herbáceas, las zonas de

intercambio más críticas, como ocurre principalmente con los sobrecalentadores en las plantas de generación eléctrica, suelen disponerse en las calderas de biomasa verticalmente y fuera de la propia cámara de combustión, a fin de aminorar los fenómenos de deposición que se producirían en el caso de estar dispuestos horizontalmente y dentro del propio combustor, como ocurre en las calderas de carbón. Asimismo, muchos equipos de combustión de biomasa poseen una precámara de combustión en la que, a una temperatura inferior a la de combustión, se desgasifica la biomasa y se producen parte de las cenizas del proceso, reduciéndose así, los fenómenos de deposición y aglomeración en la cámara de combustión propiamente dicha.

En la Figura N° 19 se muestran en esquema diferentes detalles de diseño típicos de las calderas de biomasa, como el sistema de alimentación por tornillo precedido de una válvula alveolar para conseguir una dosificación más homogénea del combustible, así como para evitar retrocesos de llama hasta el silo de alimentación; la parrilla móvil (en cascada, en el caso de la Figura) y el sistema de extracción automática de cenizas. Como puede apreciarse, el sistema de intercambio no está en contacto directo con la cámara de combustión.

Figura N° 19: Esquema de una caldera de biomasa



Una variante de la tecnología de parrillas descrita es la denominada de afloración que, en general, se emplea para calderas del sector doméstico o industriales de pequeño tamaño.

Esta tecnología realiza la alimentación de la biomasa (Figura N° 20) por la parte inferior de la parrilla (giratoria en el caso de la Figura) mediante un tornillo. La biomasa aflora a la superficie de la parrilla en la parte media de ésta.

Figura N° 20: Esquema de una caldera de biomasa de a floración con parrilla giratoria.

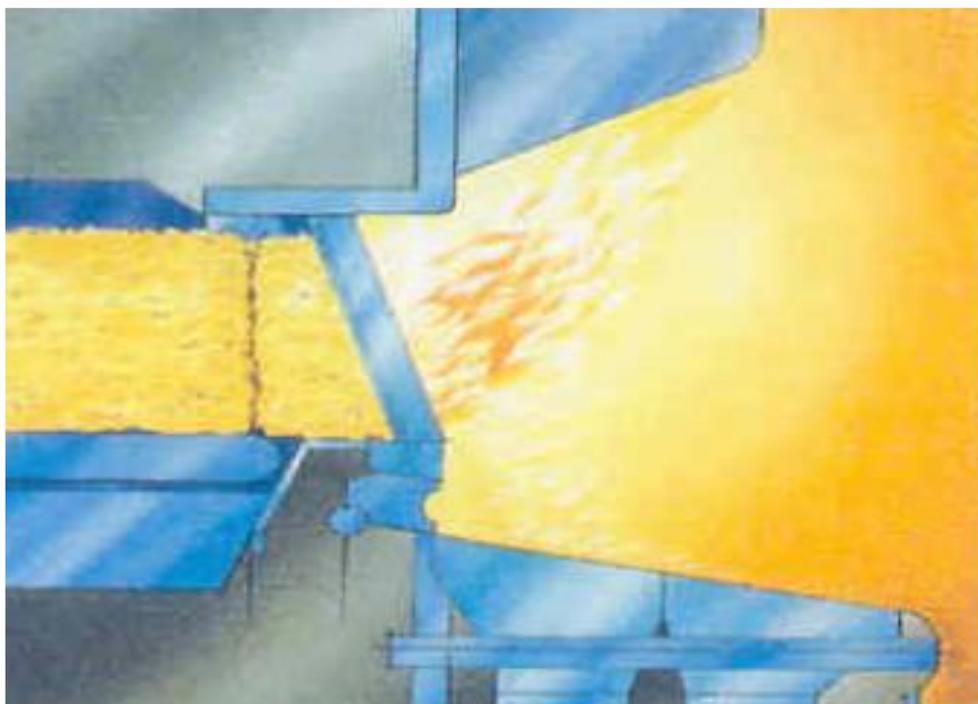


Las biomásas de pequeña granulometría y/o baja densidad, como los serrines de madera y la paja de cereales, se queman a veces en calderas de parrilla de combustible en suspensión. En este tipo de calderas, como su nombre indica, la combustión de las partículas de combustible se realiza fundamentalmente en suspensión, quedando sobre la parrilla las cenizas y partículas carbonosas, de mayor densidad, en ignición (ascuas). Debido al poco combustible depositado sobre la parrilla, este tipo de calderas presentan una superficie específica de parrilla muy pequeña, en relación con las calderas convencionales, ya descritas.

En la Figura N° 21 se muestra el esquema de un tipo de calderas de parrillas en suspensión con tecnología denominada en inglés “cigar-firing”, para la combustión de balas de paja sin disgregar. Cuando la bala entra en la

cámara de combustión es afectada por una corriente vertical de aire que determina su ignición y la disgregación de las partículas que pasan a estar en suspensión.

Figura N° 21: Esquema de caldera con tecnología cigar firing.



Los materiales biomásicos presentan en su combustión problemas de emisiones, principalmente de partículas de pequeño tamaño que sobrepasan los ciclones y hacen precisa en grandes plantas térmicas la utilización de filtros de mangas o electrofiltros como elementos de limpieza adicionales. Sin embargo, los gases no precisan por lo general del lavado de los mismos, debido al bajo contenido de azufre de la biomasa.

Puede concluirse, por tanto, que la biomasa y los biocombustibles sólidos derivados presentan una etapa de producción compleja y que, principalmente la biomasa de tipo herbáceo, es un combustible de escasa calidad, lo que repercute negativamente sobre su precio y en los

costos de inversión y mantenimiento de los equipos de conversión energética.

Además de la tecnología de parrilla que, como ya se ha mencionado, es en la actualidad la más difundida para la combustión de la biomasa, en los últimos treinta años está tomando auge en el mercado la tecnología de lecho fluidizado para grandes equipos que se está utilizando tanto en grandes plantas térmicas y termoeléctricas alimentadas con biomasa.

La tecnología de lecho fluidizado se basa en producir la reacción de que se trate (en nuestro caso la combustión) en un medio de reacción denominado lecho en el que las partículas de combustible se mueven de forma parecida a las de un líquido (movimiento browniano) (de ahí el nombre de la tecnología). Para lograr estas condiciones, en los combustores de lecho fluidizado se introduce el aire primario a través de la denominada placa de distribución de aire (Figura N° 22) situada en la base del combustor. La placa de distribución tiene un diseño específico, lo que junto a la velocidad de inyección del aire, producen la fluidización del combustible que se alimenta sobre la placa. En los combustores de lecho fluidizado, generalmente cilíndricos, domina la altura frente al ancho, utilizándose generalmente proporciones de 5 frente a 3.

Figura N° 22: Placa de distribución de campanas (cada campana tiene tres orificios para el aire primario) de un combustor de lecho fluidizado.



Como consecuencia de las condiciones de fluidización, la transferencia de calor, debido a la gran superficie de contacto entre combustible y comburente, es muy alta, y esto a su vez, determina unas velocidades de reacción tan elevadas que hacen posible trabajar en estos combustores a temperaturas inferiores a las de los equipos de parrilla, unos 850 °C frente a los alrededor de 1000°C que utilizan los segundos. Esta circunstancia representa una gran ventaja para la tecnología de combustión de biomasa en lecho fluidizado ya que permite disminuir las emisiones de óxidos de nitrógeno y la formación de aglomerados y escorias producidos en la combustión de la biomasa.

Asimismo la de lecho fluido (o fluidizado) es una tecnología más eficiente en general que la de parrilla frente a los

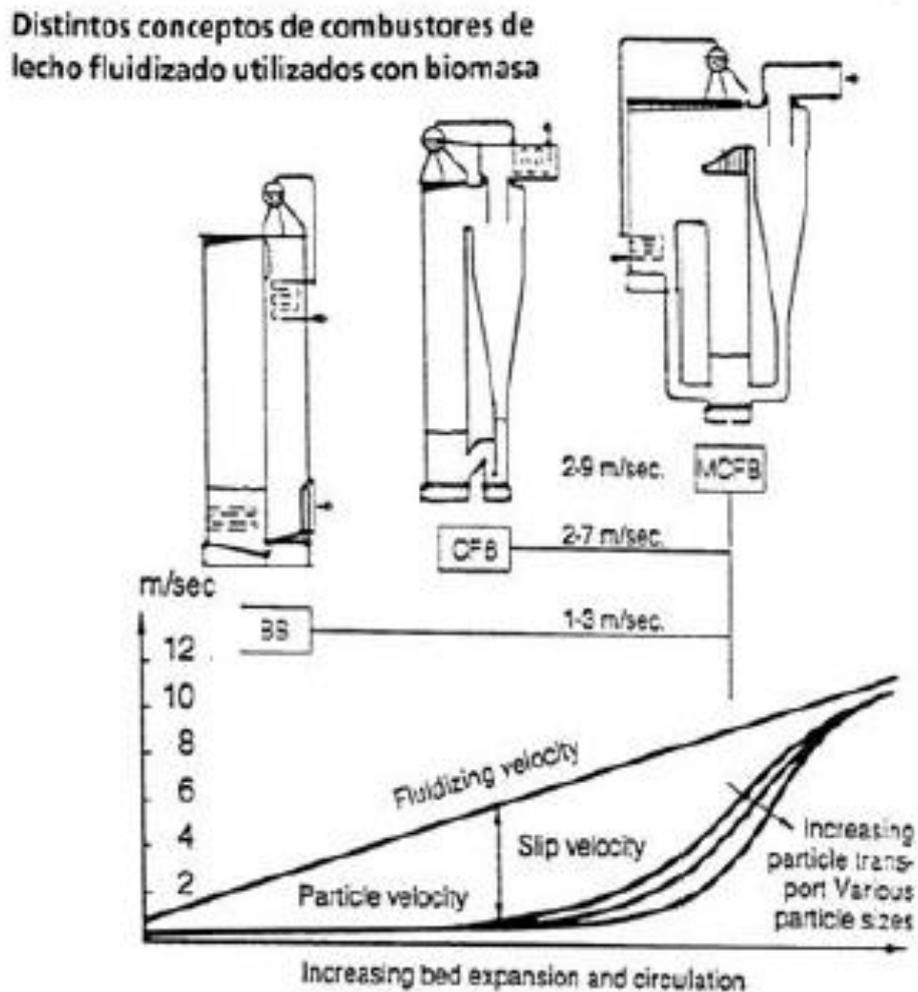
variables contenidos de humedad y la gran heterogeneidad que suele presentar la biomasa en sus características físicas. Esta tecnología utiliza combustibles de pequeña granulometría (partículas de, aproximadamente, 3 – 4 cm de dimensión máxima), que, en general, no son muy aptos para los equipos de parrilla.

Sin embargo, este tamaño supone unos mayores costos del combustible en el caso de que sea necesario un proceso de astillado o molienda del mismo.

Otro inconveniente de la tecnología de lecho fluidizado son los mayores costos de inversión y de mantenimiento en relación a las instalaciones con equipos de parrilla.

Atendiendo al grado de expansión del lecho, se puede hablar de combustores en lecho fluidizado burbujeante o circulante. En los primeros, el lecho en agitación presenta un aspecto de burbujeo, sin que las partículas se escapen de él en cantidades significativas. Cuando la velocidad del aire primario es lo suficientemente grande, las partículas escapan del lecho y salen ardiendo por la parte superior del combustor, reciclándose al interior del mismo por medio de un ciclón. (Figura N° 23).

Figura N° 23: Esquema de distintos conceptos de combustores de lecho fluidizado.



La tecnología de lecho fluidizado más difundida con biomasa es la de tipo burbujeante debido a su mayor viabilidad económica en plantas de relativamente pequeño tamaño como son las de biomasa (ver más adelante Aplicaciones térmicas y eléctricas de la biomasa).

Aunque con una implantación mucho menor que las anteriores, existen también como tecnologías comerciales para la combustión de la biomasa los hornos de combustible pulverizado y los de combustión ciclónica. Los primeros tienen la ventaja de facilitar la utilización conjunta

de biomasa de granulometrías diferentes en una única cámara de combustión, si bien tienen el inconveniente de los altos costos de la molienda fina de la biomasa y los segundos son especialmente adecuados para biomasa de pequeña granulometría.

En la tabla N° 10 se indican, de forma comparativa, algunas características de las tecnologías de combustión de la biomasa mencionadas.

Tabla N° 10: Tecnología más relevantes de combustión de la biomasa en la UE y algunos fabricantes de referencia.

| Rangos de capacidad de los equipos | Tecnología de combustión / fabricante | Rendimiento energético máximo | Costes de inversión comparativos | Necesidad de limpieza del gas de chimenea (I) |
|--|---|-------------------------------|----------------------------------|--|
| De 33 MW _{th} y max. 10 MW _{el} a 63 MW _{th} y max. 20 MW _{el} | Combustor de parrilla GeKa | 88% | Bajos | Tratamiento de los gases necesario en algunos casos. |
| De 33 MW _{th} y max. 10 MW _{el} a 63 MW _{th} y max. 20 MW _{el} | Combustor de lecho fluidizado Babcock Borsari Power Austrian Energy | 92 – 94% | Altos | No es preciso tratamiento. |
| De 15 MW _{th} a 35 MW _{th} | Combustor de lecho fluidizado Ahlstrom/Finland | 92 – 94% | Altos | No es preciso tratamiento. |
| De 1 MW _{th} y max. 200 kW _{el} a 20 MW _{th} y max. 6 MW _{el} | Combustor ciclónico vertical BTU Cottbus, BBP IK Peitz, ERI | 94% | Medios | No es preciso tratamiento. |
| N.D. | Combustor de combustible pulverizado Schoppe | 94% | Medios – Altos | Tratamiento de los gases necesario en algunos casos |

| Rangos de capacidad de los equipos | Tecnología de combustión / fabricante | Rendimiento energético máximo | Costes de inversión comparativos | Necesidad de limpieza del gas de chimenea (l) |
|------------------------------------|---|-------------------------------|----------------------------------|---|
| 18 MW _{th} | Tecnología combinada parrilla / combustible pulverizado Fa. Weiss, Dillenburg | 94% | Altos | Tratamiento de los gases necesario en algunos casos |

3) Procesos y Tecnologías para la Producción de Biocarburantes

Este Capítulo trata de los principales procesos bioquímicos y químicos relacionados con la producción de Biocarburantes. El bioetanol se produce de la biomasa mediante un proceso bioquímico mientras que su derivado, el ETBE y el biodiesel se obtienen mediante procesos de tipo químico.

a) Procesos bioquímicos y químicos.

Los procesos bioquímicos y químicos de conversión energética de la biomasa están relacionados con la producción de importantes biocombustibles intermedios, como es el caso del biogás y del bioetanol.

El primero tiene aplicaciones en la producción de calor y electricidad y el segundo constituye el biocombustible de transporte más utilizado en la actualidad.

Como ya se ha mencionado, estos procesos son producidos por la acción sobre determinadas fracciones de la biomasa de microorganismos o sus enzimas. La actividad microbiana precisa siempre de la presencia de agua en el medio, por lo

que, a diferencia de lo que ocurría en el caso de los procesos termoquímicos, en este caso las biomásas más adecuadas para utilizarse como materias primas son, en principio, aquellas de naturaleza líquida o que tengan un alto contenido en humedad.

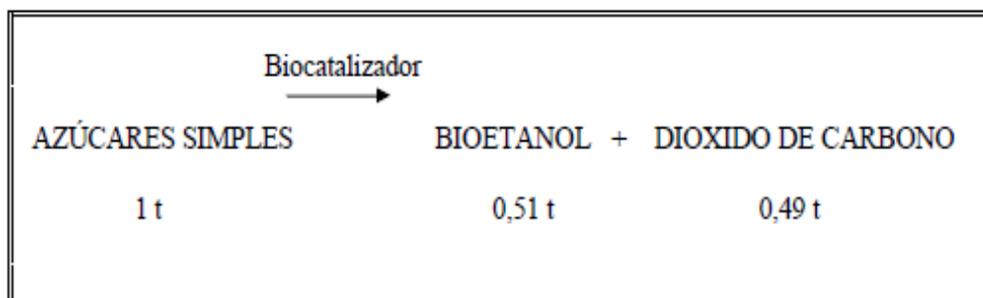
- **Procesos bioquímicos**

Como principal proceso bioquímico desarrollado a nivel comercial para la producción de Biocarburantes puede citarse la fermentación alcohólica que tiene como producto final el bioetanol.

Fermentación alcohólica. La fermentación alcohólica es un proceso que se produce por acción de microorganismos, normalmente levaduras del género *Saccharomyces* en los procesos comerciales, sobre los azúcares de la biomasa, para rendir etanol. El etanol producido mediante este proceso se denomina bioetanol y se utiliza como combustible de vehículos, en sustitución de la gasolina.

En la Figura N° 24 se muestra la ecuación global de producción de etanol a partir de un azúcar simple común y altamente fermentable, como la glucosa.

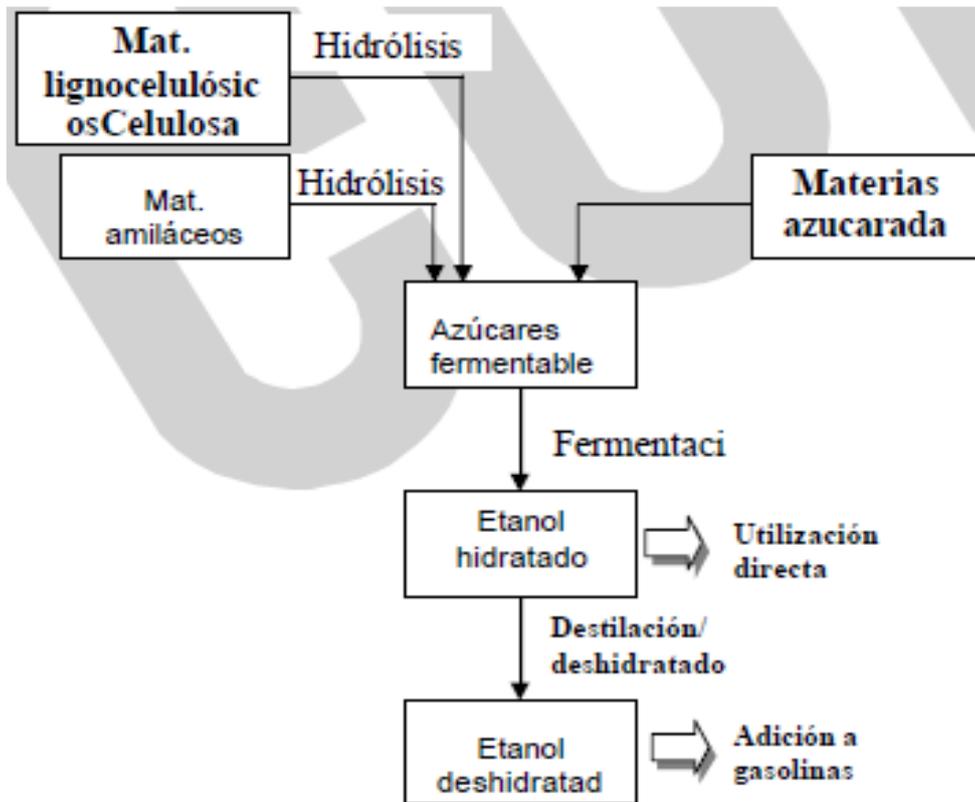
Figura N° 24: Ecuación global del proceso de fermentación alcohólica



Como se observa en la Figura, el rendimiento teórico de etanol se sitúa en 0.51 g etanol/g azúcar, si bien en los procesos de fermentación este parámetro no suele ser superior a 0.46 g. etanol/g azúcar, debido a que las levaduras consumen una parte del azúcar como nutriente para su crecimiento.

No todas las fracciones azucaradas de la biomasa presentan la misma facilidad para su conversión en etanol. En el caso de algunos azúcares como la glucosa y la fructosa contenidos en frutos, y la sacarosa de la remolacha y la caña de azúcar, la fermentación es un proceso directo y, en general, con un alto rendimiento final. Sin embargo azúcares más complejos, como el almidón contenido en productos como la patata o los granos de cereales, y la celulosa contenida en la biomasa lignocelulósica, no pueden, por lo general, ser fermentados directamente por los microorganismos y requieren de un proceso previo de hidrólisis para su transformación en los azúcares simples ya fermentables que componen sus cadenas. En la Figura N° 25 se muestra un esquema de la transformación a etanol de los principales tipos de materias primas para la producción de bioetanol.

Figura N° 25: Diagrama de los procesos de producción de bioetanol.



A nivel industrial, la hidrólisis del almidón se efectúa con enzimas específicas (amilasas), mientras que la hidrólisis de la celulosa es un proceso todavía en desarrollo y puede llevarse a cabo con ácidos o enzimas. Las materias primas de base empleadas por la industria para la producción de etanol son productos agrícolas entre los que se encuentran como principales los siguientes:

- Caña de azúcar. Se utiliza principalmente en Brasil.
- Granos de cereales. El maíz se emplea en Estados Unidos y en Europa se utilizan, principalmente, el trigo y la cebada.
- Con mucha menor importancia que los anteriores se usan también la remolacha de producción excedentaria, la cassava, las melazas e, incluso, el vino de uva procedente de excedentes de cosecha.

En la Tabla N° 11 se indican los rendimientos de bioetanol que pueden obtenerse por fermentación de diferentes productos agrícolas.

Tabla N° 11: Rendimientos de bioetanol de diferentes materias primas.

| PRODUCTO | RENDIMIENTO l/t |
|---------------------|------------------------|
| Maíz | 320 – 350 |
| Sorgo | 300 – 360 |
| Trigo | 320 – 350 |
| Centeno | 300 – 340 |
| Avena | 240 – 260 |
| Cebada | 290 – 320 |
| Remolacha azucarera | 83 – 95 |
| Caña de azúcar | 57 – 65 |

Los procesos industriales de obtención de bioetanol son diversos y dependen del tipo de materia prima elegida.

Para las biomásas azucaradas, con azúcares solubles y directamente fermentables, estos procesos consisten, de forma general, en una extracción con agua caliente de dichos azúcares que son, a continuación, fermentados.

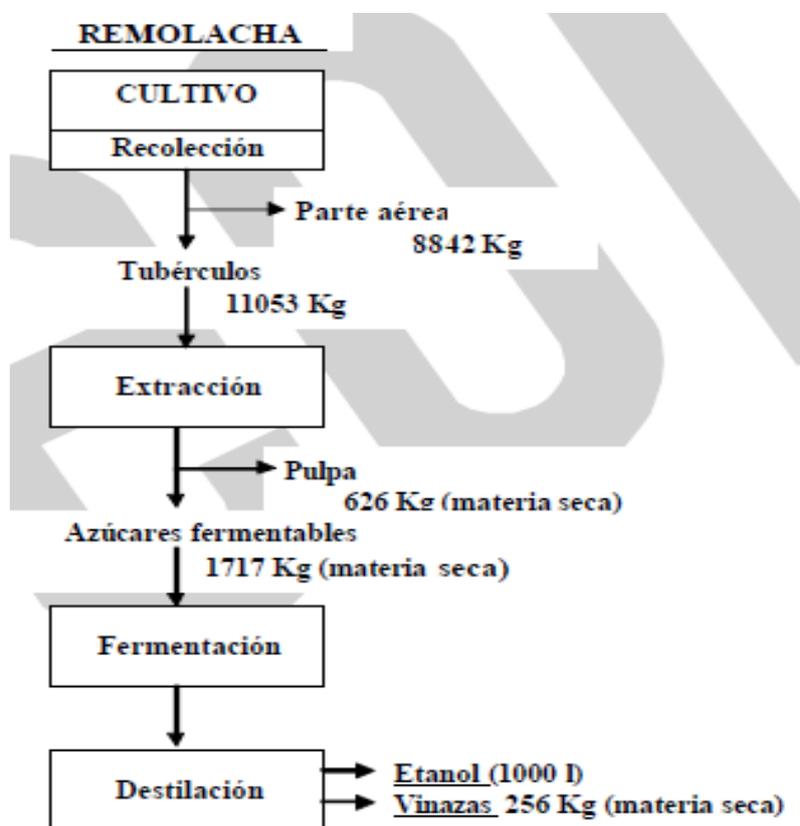
El modo de extraer el líquido azucarado de estas biomásas varía, a su vez, dependiendo de los diferentes materiales. Así, en el caso de la caña de azúcar, los tallos se muelen inicialmente, con lo que se separa el jugo rico en azúcares solubles de la parte lignocelulósica, que posteriormente es lavada con agua caliente y prensada para agotar los azúcares. El residuo sólido resultante es el denominado bagazo que constituye alrededor de un 40% - 45% del peso fresco inicial de los tallos y que puede utilizarse como material lignocelulósico para la producción de calor de proceso y electricidad.

Los tubérculos de la remolacha son tratados por la industria azucarera mediante una división inicial en piezas de tamaño y forma muy específicos denominados “cosetas” que, posteriormente, son sometidos a una extracción con agua caliente a reflujo en unos equipos denominados extractores. Esta operación es la más costosa en términos de inversión y gasto energético de todas las que componen el proceso y de ella se obtiene como subproducto la pulpa de los tubérculos que, previamente desecada, se dedica a alimentación animal.

Tras la extracción de los azúcares se procede a realizar la fermentación directa de las mismas y posteriores destilaciones para separar el etanol de las vinazas.

En la figura N° 26 se muestra un esquema y balance indicativo de materia del proceso descrito.

Figura N° 26: Esquema del proceso convencional de etanol hidratado.



NOTA: Todas las cantidades expresadas como materia fresca, excepto cuando se indica expresamente otra base.

La producción de etanol a partir de los granos de cereales y de las materias primas amiláceas, en general, se lleva a cabo por la industria a partir del almidón u otros poliazúcares (inulina) contenidos en dichas materias primas, mediante hidrólisis previa, generalmente con enzimas, a fin de obtener azúcares fermentables por las levaduras.

La producción de etanol a partir de granos de cereales se realiza comercialmente mediante dos procesos distintos:

i) Vía húmeda. Este método emplea el procedimiento de fraccionamiento del grano que utiliza la industria almidonera y de producción de fructosa.

El procedimiento está basado en un remojo inicial del grano en una solución acuosa de SO₂ al 0,1 – 0,2 %, lo que produce un reblandecimiento del grano que favorece la separación posterior de las distintas fracciones que lo componen y que presentan una utilidad industrial.

En la Figura N° 27 se indica en esquema el proceso global aplicado al maíz, junto con las diferentes fracciones obtenidas como subproductos. Estos subproductos: "corn steep liquor", gluten y el residuo de la destilación, una vez desecado, tienen un alto valor añadido debido a su alto contenido en vitaminas del grupo B y proteínas de alta calidad y poseen numerosas aplicaciones en cosmética, fabricación de alimentos infantiles y dietéticos, fabricación de piensos, aditivos vitamínicos y nitrogenados en procesos de fermentación industrial, etc.

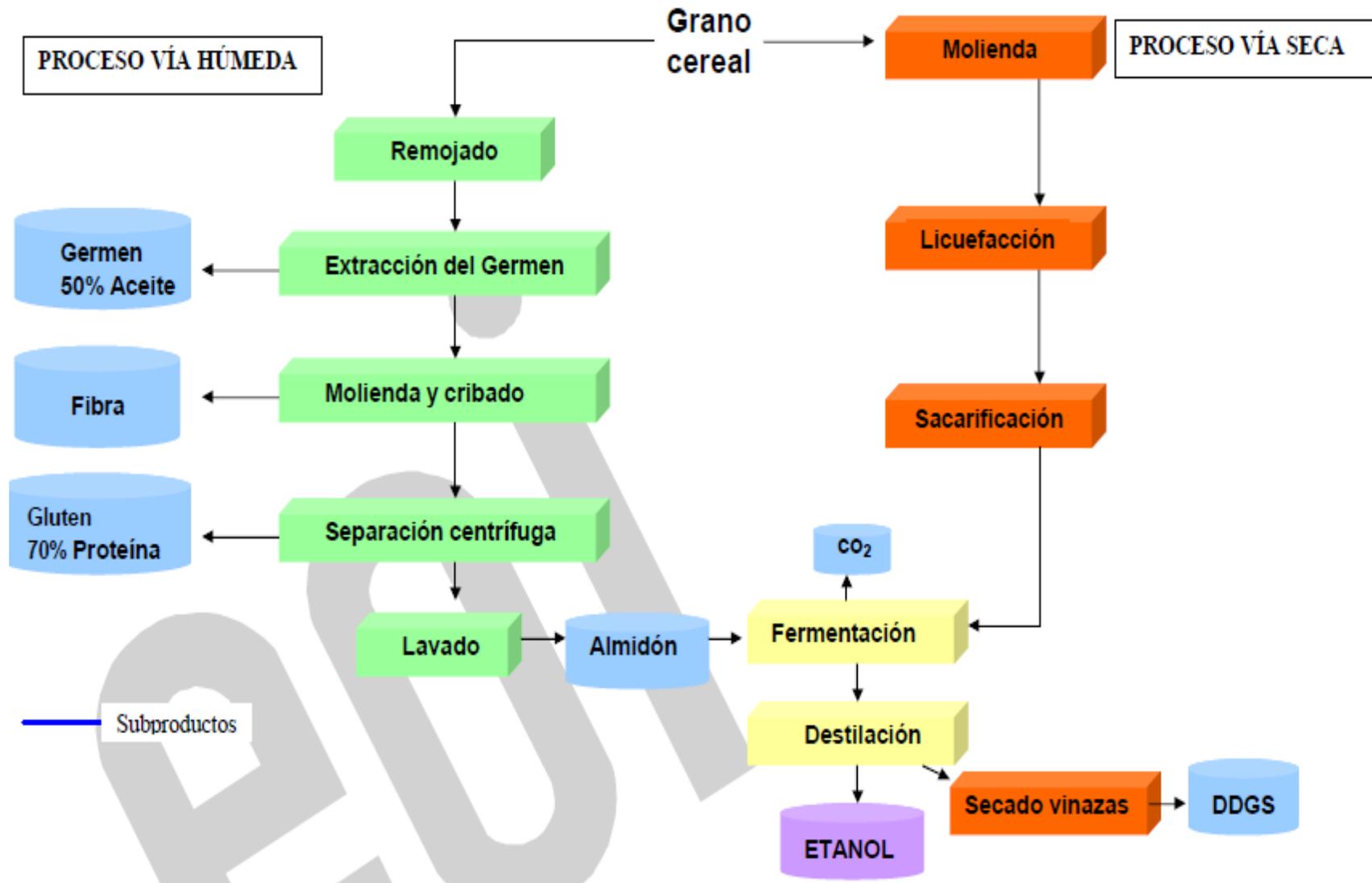
En la práctica, la producción de bioetanol para su empleo como combustible de los cereales vía húmeda presenta diferentes inconvenientes. Así, es un procedimiento complejo, con un gran número de operaciones y de subproductos finales, lo cual supone elevados costes de inversión inicial y, sobre todo, una gran dependencia del costo de producción del biocarburante de los precios de los subproductos del proceso, que se utilizan en mercados distintos al energético. Además, con este proceso, la producción masiva de bioetanol de cereales podría influir muy negativamente sobre el precio actual en el mercado de dichos subproductos, como el gluten, aceite de germen, etc, lo que determinaría una reducción del beneficio por venta de subproductos y un perjuicio a las actuales industrias que los fabrican como productos principales de su producción.

Por este motivo, en Estados Unidos, país en el que ya existe una importante producción de bioetanol a partir de maíz, se está implantando cada vez más en las industrias de bioetanol un proceso alternativo al anterior denominado de “vía seca”, con el que ya se produce alrededor de un 40% del bioetanol destinado a combustible. En la figura V.3-25 se indican en esquema las diferentes etapas de este proceso. En la Unión Europea la totalidad de la producción de bioetanol a partir de trigo y cebada fundamentalmente, se lleva a cabo vía seca.

- ii) **Vía seca.** Esta es una versión muy simplificada de la vía húmeda y consiste en llevar a cabo una molienda del grano y posterior hidrólisis de la masa total obtenida sin ningún tipo de separación o bien, a lo sumo, con una

separación del gluten tras la fase de molienda. Así, la fermentación se realiza en un medio que, además del almidón hidrolizado, contiene el resto de los componentes del grano, incluida la fracción protéica, la lignocelulósica (salvado) y otros insolubles (Figura N° 27).

Figura N° 27: Esquema de la producción comercial de etanol a partir de cereal.

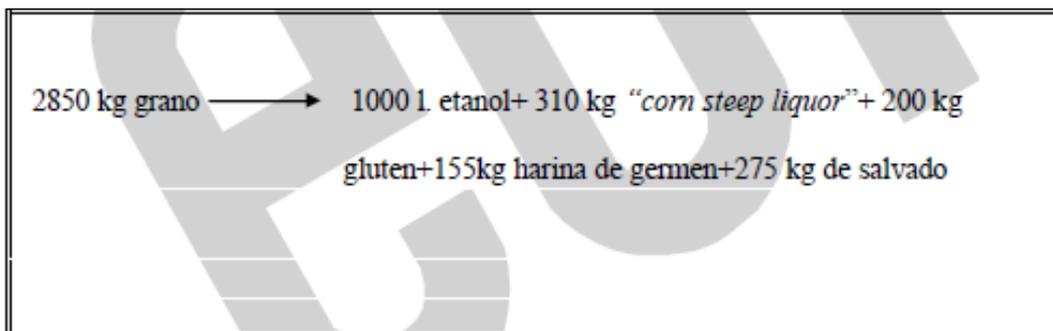


El proceso por vía seca carece de los inconvenientes citados anteriormente ya que, en general, como único producto residual se obtienen las vinazas de destilación denominadas DDGS² que, previa desecación, pueden utilizarse para la elaboración de piensos ya que poseen un alto contenido en proteínas (al menos un 27% en el DDGS procedente del maíz), aceites esenciales y vitaminas.

En cualquier caso, la conveniencia de uno u otro proceso de obtención vendrán dados por factores tales como el tamaño y producción de la planta, la demanda y el precio a que sea posible vender los subproductos, etc.

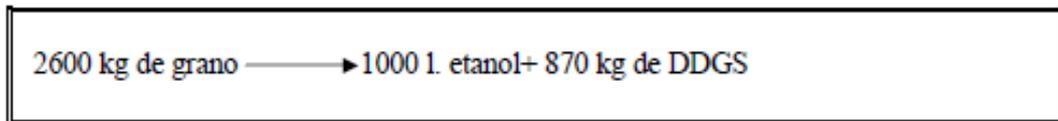
En las Figuras N° 28 y N° 29 se muestran los balances de masa indicativos de ambos procesos. Todas las cantidades están expresadas en estas Tablas en base seca.

Figura 28: Balance de masas de la producción de bioetanol a partir del trigo mediante el proceso de vía húmeda.



² DDGS: Dried Distillers Grain Solids

Figura 29: Balance de masas de la producción de bioetanol a partir del trigo mediante el proceso de vía seca.



- **Procesos químicos**

Los principales procesos de tipo químico relacionados con la conversión energética de la biomasa son los de producción del ETBE como derivado del etanol y el proceso de transesterificación o reacción de aceites vegetales con un alcohol, normalmente metanol, para dar lugar al biodiesel o metilester correspondiente al aceite vegetal de partida.

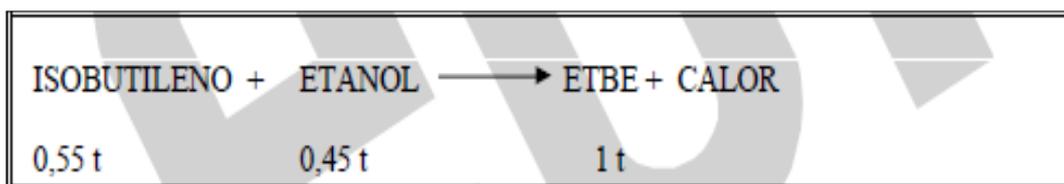
Producción de ETBE. El etiltercbutileter (ETBE) es un derivado del etanol que se emplea como aditivo oxigenado de la gasolina.

En la Figura N° 30 se muestra la reacción que da lugar al ETBE y el balance de masas del proceso.

La producción de ETBE tiene lugar en las propias refinerías de petróleo o en los complejos petroquímicos anejos a las mismas ya que el isobutileno que interviene en la reacción es un subproducto de la destilación del petróleo. El proceso se lleva a cabo a 8 – 10 atmósferas de presión y unos 220° - 250°C, utilizándose catalizadores metálicos.

Como puede observarse en la Figura V.3-27, se precisan unos 450 kg de bioetanol y 550 kg de isobutileno para la fabricación de 1 tonelada de ETBE.

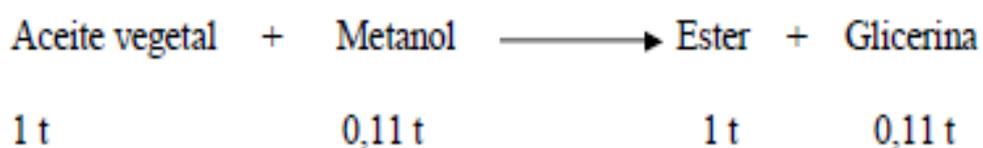
Figura N° 30: Reacción de obtención del EBTE y balance de masas del proceso.



El proceso descrito de obtención de ETBE es totalmente análogo al utilizado en la fabricación del MTBE³, aditivo ya utilizado en la gasolina sin plomo, pudiéndose, de hecho, producir ambos compuestos en la misma planta, con tan solo introducir adaptaciones de poca importancia que exigen una inversión relativa muy pequeña.

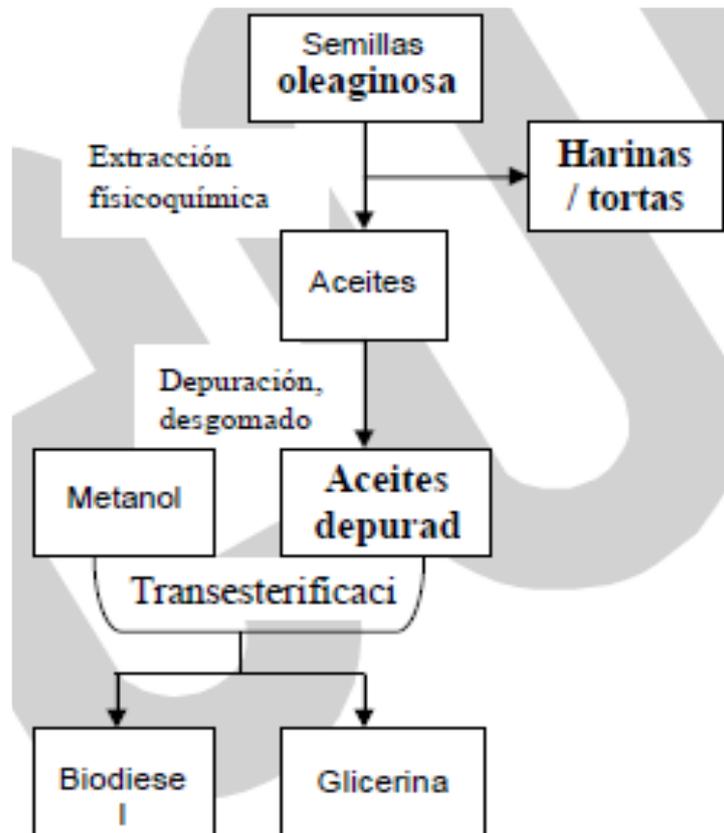
Producción de biodiesel (transesterificación). En la Figura N° 31 se indica la ecuación global del proceso de transesterificación y el balance masas del mismo. Como muestra esta Figura, a partir de 1 tonelada de aceite vegetal se obtienen, aproximadamente 1 tonelada de metilester (biodiesel) y unos 110 kg de glicerina como subproducto, además de cantidades menores de ácidos orgánicos que provienen de las cadenas de ácidos grasos del aceite.

Figura N° 31: Reacción de transesterificación y balance de masas aproximado del proceso.



³ MTBE: metilterbutileter

Figura N° 32: Diferencias etapas del proceso industrial de fabricación del biodiesel.



Los actuales procesos para la producción a escala industrial de aceites vegetales para su uso como combustibles no difieren básicamente de los clásicamente empleados por las industrias oleícolas, que se basan en un prensado inicial de las semillas o frutos oleaginosos y extracción del aceite restante en la torta de prensado mediante solventes orgánicos. Posteriormente se lleva a cabo la fase de refinado del aceite bruto que comprende, fundamentalmente, tres operaciones:

- a) Degomado.- o etapa de eliminación de la lecitina y otros fosfolípidos a fin de aumentar la pureza química y disminuir la viscosidad del aceite;
- b) Decoloración y

- c) Desodorización, para evitar el olor y sabor desagradables. Las dos últimas operaciones sirven para mejorar la calidad alimenticia del producto y se suelen llevar a cabo con filtros de carbón activo.

Tras la obtención del aceite y, a veces, por la propia industria oleícola, se procede a la operación de transesterificación en la que, como ya se ha descrito, se hace reaccionar el aceite vegetal con metanol en la presencia de un catalizador ácido o más frecuentemente básico, el hidróxido potásico.

El proceso se realiza en condiciones suaves, a 80 °C – 90 °C y 1 atm de presión y es análogo a los utilizados por la industria glicerífera, para la que la glicerina constituye, sin embargo, el producto principal.

En la fabricación de los metilesteres, una etapa fundamental es la de separación, tras la reacción, del producto principal del resto de subproductos que se encuentran en el medio y, especialmente, de la glicerina y el metanol residual. Esto es debido a que la presencia, incluso en pequeñas cantidades, de la primera contribuye a dificultar el filtrado en frío del biocombustible, de tal forma que, de no conseguirse metilesteres de la adecuada pureza, pueden ocurrir problemas importantes para el paso de los mismos por los elementos filtrantes del motor y, en general, de los sistemas de distribución y almacenaje. En cuanto al metanol, aunque contribuye a paliar el efecto descrito, su presencia como contaminante ocasiona un incremento de la volatilidad de los metilesteres que determina un aumento en la peligrosidad del manejo de los mismos. Así, el punto de evaporación (“flash point”) del metilester de aceite de colza

puro pasa de 0°C hasta más de 55°C, con tan solo un 2% de metanol de impureza, valor que no es aceptable por las especificaciones vigentes para el gasóleo.

La presencia de los compuestos citados es, por tanto, un punto fundamental que hay que considerar a la hora de definir las especificaciones de los Biocarburantes y que, en general, tiende a restringirse al máximo.

CAPÍTULO III

PLANTEAMIENTO METODOLÓGICO

3.1. TIPO Y NIVEL DE LA INVESTIGACION.

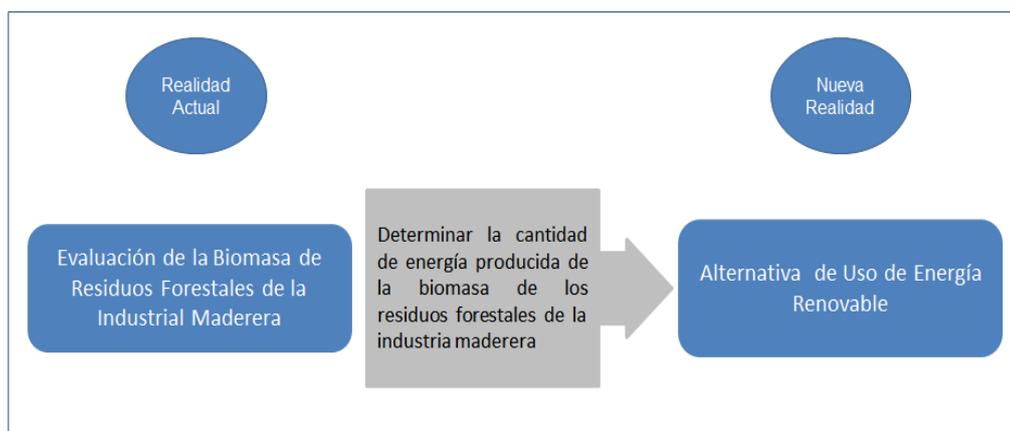
3.1.1. Tipo de la Investigación

El presente proyecto titulado "EVALUACIÓN ENERGETICO DE LA BIOMASA DE LOS RESIDUOS FORESTALES, COMO ALTERNATIVA DE USO DE ENERGÍA RENOVABLE EN LA CIUDAD DE PUCALLPA – UCAYALI", se encuentra enmarcado en la modalidad de Proyecto Factible, ya que proporciona una solución posible a un problema del tipo práctico, para solucionar un problema energético y ambiental en la zona industrial maderera de la ciudad de Pucallpa, distrito de Manantay, provincia de Coronel Portillo en el departamento de Ucayali.

El proyecto factible consiste en la propuesta de evaluar la biomasa de los residuos forestales provenientes de la industria maderera para cuantificar el potencial energético y posterior uso como alternativa de energía renovable.

Se puede destacar que las fases metodológicas que sigue la investigación, se adaptan a la afirmación anterior.

Figura N° 33: Esquema del tipo de investigación.



Fuente: Elaboración propia

3.1.2. Nivel de la Investigación

La investigación es APLICADA: porque busca el conocer para hacer, para actuar (modificar, mantener, reformar o cambiar radicalmente algún aspecto de la realidad). Es decir, se caracteriza por su interés en la aplicación, utilización y consecuencias prácticas de los conocimientos.

3.2. MÉTODO DE LA INVESTIGACIÓN

El método a utilizar en el presente estudio es el método de Análisis, ya que se estudiarán y evaluarán los resultados obtenidos del experimento, con ayuda de herramientas del campo de la estadística, lo cual orientará a la confirmación de la hipótesis de investigación.

Los métodos empleados en la presente investigación fueron:

- **Método Analítico – Sintético:** Permitió precisar las posibles causas y soluciones de la problemática planteada.
- **Método Analítico – Comparativo:** Permitió establecer semejanzas y diferencias de los distintos tipos de biomasa que se tiene en la región.

- **Método Descriptivo – Explicativo:** Permitió lograr una mejor comprensión de la realidad.
- **Método Inductivo – Deductivo:** Permitió determinar la particularidad de la problemática a través del rozamiento mental; así mismo, de analizar la particularidad, a todo la problemática que se presenta en el estudio.

3.3. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN.

La determinación del potencial energético de la biomasa del aserrín, implicará conocer la opción de uso como fuente alternativa energética renovable en la ciudad de Pucallpa.

3.3.1. Hipótesis General

La determinación del potencial energético de la biomasa del aserrín, implicará conocer la opción de uso como fuente alternativa energética renovable en la ciudad de Pucallpa.

3.3.2. Hipótesis Específicas

- El cálculo de la masa de los residuos de biomasa del aserrín, permitirá conocer la magnitud del potencial energético que produce la industria maderera.
- La determinación de la cantidad de energía producida de los residuos de la biomasa del aserrín generados por la industria maderera, implicará el uso como alternativa de energía renovable.
- El cálculo de la cantidad de emisión que se produce de CH₄ por los residuos de la biomasa del aserrín, determinará el efecto que contribuye al calentamiento global por no uso como alternativa energética.
- La descripción de los beneficios del uso de la biomasa de los residuos del aserrín por la industria maderera, permitirá viabilizar el uso de la biomasa como alternativa renovable.

3.4. VARIABLE DE LA INVESTIGACIÓN.

3.4.1. Variable Independiente

A. Evaluación de la Biomasa de los Residuos Forestales

Todo material de origen biológico excluyendo aquellos que han sido englobados en formaciones geológicas sufriendo un proceso de mineralización.

B. Indicadores

- Masa de la biomasa del aserrín (kg)
- Características de la biomasa del aserrín (Global)
- Poder Calorífico de la Biomasa de Residuos Forestales (kJ/kg)

3.4.2. Variable Dependiente

A. Potencial Energético

Cantidad total de energía presente en la biomasa de los residuos forestales generados de la actividad industrial maderera, posible de ser aprovechada mediante el uso de tecnología.

Es el cálculo de la energía producida a partir de la biomasa de los residuos forestales generados por la industria maderera.

B. Indicadores

- Potencia eléctrica (kilowatts - kW)

3.5. COBERTURA DEL ESTUDIO DE INVESTIGACIÓN.

3.5.1. Universo

Las empresas industriales de la actividad maderera de la Provincia de Coronel Portillo.

3.5.2. Población

Las empresas industriales de la actividad maderera de la ciudad de Pucallpa.

3.5.3. Muestra

Las empresas industriales de la actividad maderera del distrito de Manantay.

3.6. TÉCNICAS, INSTRUMENTOS Y FUENTES DE RECOLECCIÓN DE DATOS

3.6.1. Técnicas de la Investigación.

Para esta investigación se utilizaron las siguientes técnicas:

- La encuesta. Técnica que permitió elaborar en función del problema planteado, la hipótesis y las variables identificadas, la información necesaria para validar el presente trabajo de investigación.
- Análisis documental. Se utilizó esta técnica para analizar las normas, información bibliográfica y otros aspectos relacionados con la investigación.
- Observación. Observaremos en la realidad práctica que hechos científicos son relevantes para esta investigación.
- Búsqueda en Internet. A través de este servicio permitió recopilar información de las teorías existentes relacionadas al tema de investigación y afianzar los resultados obtenidos.

3.6.2. Instrumentos de la Investigación.

Los instrumentos que se utilizan en la investigación, están relacionados con las técnicas antes de recopilación, del siguiente modo, ver cuadro:

Tabla N° 12. Instrumentos de Recopilación de Datos

| Técnicas | Instrumento | Observaciones |
|----------------------------|-----------------------------|--|
| Entrevista | Guía de entrevista | Constituyó la hoja de ruta de la entrevista – Empresarios |
| Encuesta | Cuestionario | Sirvió para presentar las preguntas sobre la investigación |
| Análisis documental | Guía de análisis documental | Se utilizó para recopilarla información de textos, libros, revistas, informativos, internet y otros. |

Fuente: Propio

3.7. TECNICAS DE ANALISIS DE LA INFORMACION

Sea aplico las siguientes técnicas:

- Análisis documental
- Indagación
- Conciliación de datos
- Tabulación de cuadros con cantidades y porcentajes
- Comprensión de gráficos
- Otras.

3.8. TECNICAS DE PROCESAMIENTOS DE DATOS

Sea aplico las siguientes técnicas de procesamientos de datos:

- Ordenamiento y clasificación
- Registro manual

- Proceso computarizado
- Procesos computarizado con hoja de cálculo Excel

3.9. ANALISIS E INTERPRETACION DE RESULTADOS

En esta parte de uso el análisis lógico como el estadístico, para comprobar nuestra hipótesis y poder plantear las conclusiones y recomendaciones a la que arribamos, teniendo en cuenta siempre la confiabilidad y veracidad de los datos obtenidos y procesados con autoridad.

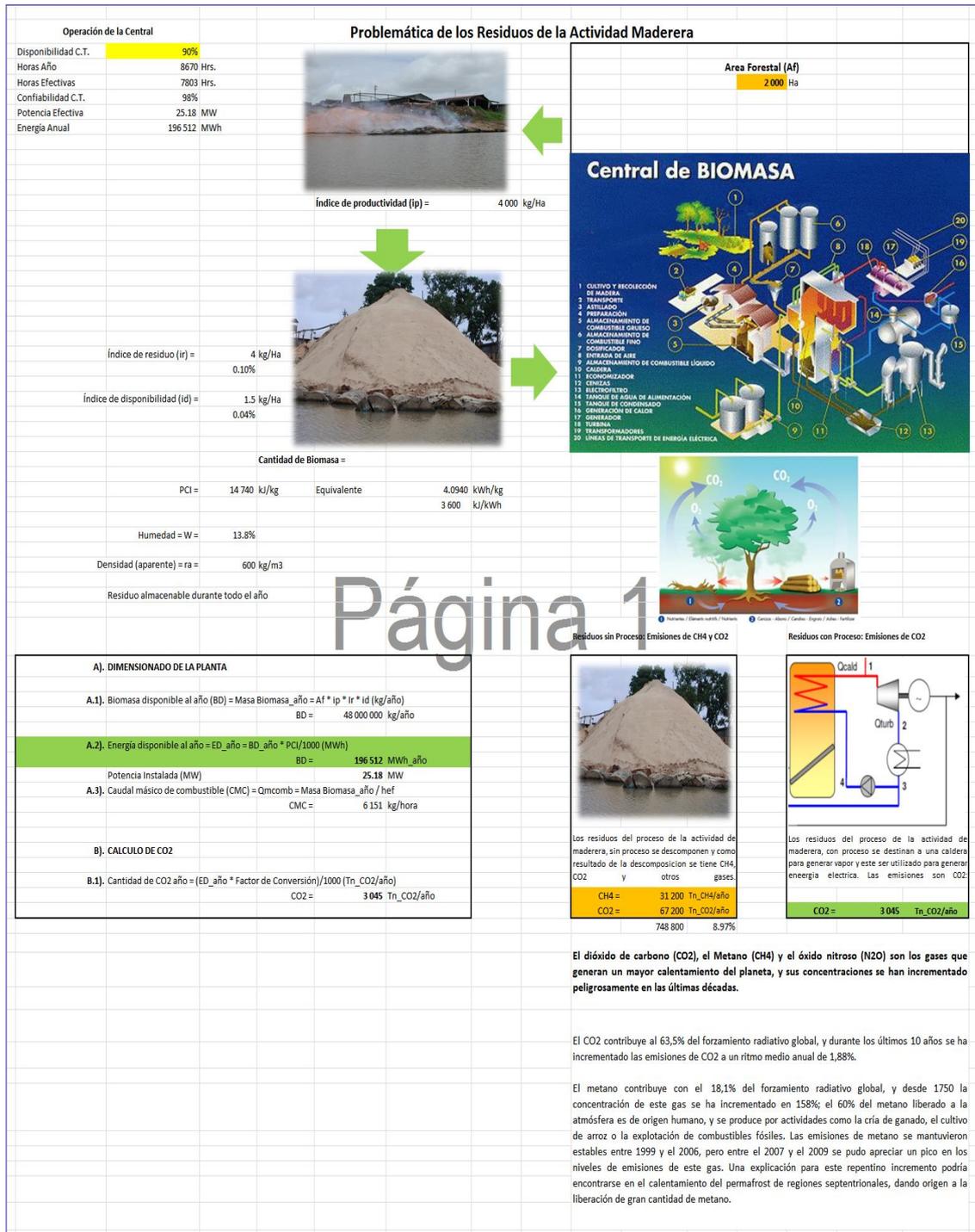
En lo referente al análisis lógico se realizará observaciones directas y constantes, para ir verificando si los objetivos planteados se cumplían o no, y en cuanto al análisis estadístico se hizo a través de las herramientas descritas en el numeral anterior (estadística descriptiva inferencia, etc.).

CAPÍTULO IV

ORGANIZACIÓN, PRESENTACIÓN, Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

Figura N° 34: Esquema del proceso de evaluación energética de la biomasa



Página 1

El dióxido de carbono (CO2), el Metano (CH4) y el óxido nítrico (N2O) son los gases que generan un mayor calentamiento del planeta, y sus concentraciones se han incrementado peligrosamente en las últimas décadas.

El CO2 contribuye al 63,5% del forzamiento radiativo global, y durante los últimos 10 años se ha incrementado las emisiones de CO2 a un ritmo medio anual de 1,88%.

El metano contribuye con el 18,1% del forzamiento radiativo global, y desde 1750 la concentración de este gas se ha incrementado en 158%; el 60% del metano liberado a la atmósfera es de origen humano, y se produce por actividades como la cría de ganado, el cultivo de arroz o la explotación de combustibles fósiles. Las emisiones de metano se mantuvieron estables entre 1999 y el 2006, pero entre el 2007 y el 2009 se pudo apreciar un pico en los niveles de emisiones de este gas. Una explicación para este repentino incremento podría encontrarse en el calentamiento del permafrost de regiones septentrionales, dando origen a la liberación de gran cantidad de metano.

4.1.1. Resultados parciales

a) Cálculo de la biomasa disponible año (BD)

Biomasa disponible = Masa Biomasa año = Af*ip * Ir * id (kg/año)

BD = (2000 ha * 4000 kg/ha * 4 kg/ha * 1.5 kg/ha) (kg/año)

Biomasa disponible = **48 000 000 kg/año**

Dónde:

BD: Biomasa disponible (kg/año)

Af: Área forestal (ha)

Ip: Índice de productividad (kg/ha)

Ir: Índice de residuo (kg/ha)

Id: Índice de disponibilidad (kg/ha)

b) Cálculo de la energía disponible año (ED)

Energía disponible al año = ED_año = BD_año * PCI/1000

ED = ((48 000 000 kg/año * 4.0940 kWh/kg) / 1000) (MWh)

Energía disponible al año = **196 512 MWh**

Dónde:

ED: Energía disponible (MWh)

PCI: Poder Calorico Inferior de la madera (kWh/kg)

c) Cálculo de la potencia disponible (PD)

Potencia disponible = ED_año / Hef

PD = 196 512 MWh / 7803 hr (MW)

Potencia disponible = **25.18 MW**

Dónde:

PD: Potencia disponible (MW)

ED: Energía disponible (MWh)

Hef: Horas efectivas año que funcionaria una central de generación de energía eléctrica (horas)

d) Cálculo del caudal másico de combustible (CMC)

$$\text{CMC} = Q_{m\text{comb}} = \text{Masa Biomasa}_{\text{año}} / H_{\text{ef}}$$

$$\text{CMC} = 48\,000\,000 \text{ kg/año} / 7803 \text{ hrs}$$

$$\text{CMC} = \mathbf{6\,151 \text{ kg/hr}}$$

Dónde:

CMC⁴: Caudal másico de combustible (kg/hr)

He: Horas efectivas año que funcionaria una central de generación de energía eléctrica (horas)

e) Cálculo de la emisión de CH₄ año (ECH₄) sin uso de la biomasa

$$\text{ECH}_4 \text{ año} = 0.65 * \text{BD} / 1000 \text{ (Tn_CH}_4\text{/año)}$$

$$\text{ECH}_4 \text{ año} = \mathbf{31\,200 \text{ Tn_CH}_4\text{/año}}$$

Dónde:

ECH₄: Emisión de metano (Tn_CH₄/año)

BD: Biomasa disponible (kg/año)

0.65: factor de conversión

f) Cálculo de la emisión de CO₂ año (ECO₂) sin uso de la biomasa

$$\text{ECO}_2 \text{ año} = 1.4 * \text{BD} / 1000 \text{ (Tn_CO}_2\text{/año)}$$

$$\text{ECO}_2 \text{ año} = \mathbf{67\,200 \text{ Tn_CO}_2\text{/año}}$$

Dónde:

ECO₂: Emisión de dióxido de carbono (Tn_CO₂/año)

BD: Biomasa disponible (kg/año)

1.4: factor de conversión

g) Cálculo de la emisión de CO₂ año (ECO₂) con uso de la biomasa

$$\text{ECO}_2 \text{ año} = 0.495 * \text{CMC} \text{ (Tn_CO}_2\text{/año)}$$

$$\text{ECO}_2 \text{ año} = \mathbf{3\,045 \text{ Tn_CO}_2\text{/año}}$$

⁴ Consumo específico de combustible expresados en unidad de masa por el tiempo (kg/hr)

Dónde:

ECO₂: Emisión de dióxido de carbono (Tn_CO₂/año)

CMC: Consumo másico de combustible (kg/hr)

0.495: factor de conversión

4.1.2. Resultados generales

La biomasa disponible en unidades de masa es 48 000 000 kg/año, representando en energía 196 512 MWh_año, que significa 25.18 MW de potencia disponible.

La descomposición natural de la materia orgánica (biomasa) significaría la emisión de metano (CH₄) que representa 31 200 Tn_CH₄/año, equivalentes a 67 200 Tn_CO₂/año.

Realizando el uso de la biomasa de los residuos forestales implicaría la generación de CO₂ al año de 3 045 Tn_CO₂/año.

4.2. CONTRASTACIÓN DE HIPÓTESIS

- La biomasa de los residuos forestales derivados de la industria maderera ha permitido determinar la potencia disponible de 25.18 MW, que significa un potencial energético que se puede aprovechar como una alternativa energética renovable en la ciudad de Pucallpa.
- La biomasa de los residuos forestales derivados de la industria maderera ha permitido calcular la masa disponible de 48 000 000 kg por año, que significa una cantidad significativa que puede ser aprovechado como una alternativa energética renovable en la ciudad de Pucallpa.
- La determinación de la cantidad de energía de 196 512 MWh, significa el uso de la biomasa de los residuos forestales derivados de la industria maderera, como alternativa energética renovable en la ciudad de Pucallpa.

- La biomasa de los residuos forestales generados por la industria maderera, ha permitido calcular la cantidad de emisión de CH₄ que genera por no hacer uso de la biomasa como una alternativa energética renovable en la ciudad de Pucallpa, significando 31 200 TN_CH₄/año ó 67 200 TN_CO₂/año.
- El uso de la biomasa como alternativa energética, genera beneficios al entorno, como son, reducción de la dependencia de consumo de combustibles fósiles, Ciclo neutro de CO₂, sin contribución al efecto invernadero, etc.

4.3. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El uso de la biomasa como recurso energético, en lugar de los combustibles fósiles comúnmente utilizados, supone unas ventajas medioambientales de primer orden en la ciudad de Pucallpa, potencial que significa el 50% aproximadamente de la demanda que requiere la ciudad de Pucallpa.

El fomento de la producción de biomasa para uso energético permite el desarrollo de una nueva actividad en la zona de Pucallpa, sobre la base de un mercado con una demanda continua y sin fluctuaciones, que genera puestos de trabajo estables, bien remunerados y supone una nueva fuente de ingresos para las industrias locales. Este escenario evaluado se proyecta en la posibilidad de materializarse se estima la creación de hasta cinco veces más puestos de trabajo con energías renovables que con combustibles convencionales.

CONCLUSIONES

- 1) La cantidad de biomasa de los residuos forestales representa por la actividad industrial maderera en la ciudad de Pucallpa es 48,000,000 kg año.
- 2) El potencial energético que produce a partir de la biomasa de los residuos forestales por la actividad industrial de la madera, representa 25.18 MW o 196,512 MWh.
- 3) La emisión de CH₄ que representa sin hacer uso de la biomasa representa 31 200 TN_CH₄/año ó 67 200 TN_CO₂/año.
- 4) El uso de la biomasa como recurso energético, en lugar de los combustibles fósiles comúnmente utilizados, supone unas ventajas medioambientales de primer orden, como son:
 - Disminución de las emisiones de azufre, por aquellos combustibles fósiles que tienen en su composición química el azufre.
 - Disminución de las emisiones de partículas.
 - Emisiones reducidas de contaminantes como CO, HC y NOX.
 - Ciclo neutro de CO₂, sin contribución al efecto invernadero.
 - Reducción de riesgos de incendios forestales y de plagas de insectos.
 - Posibilidad de utilización de tierras de barbecho con cultivos energéticos, con la finalidad de sembrar especies maderables.
 - Independencia de las fluctuaciones de los precios de los combustibles provenientes del exterior (no son combustibles importados).
 - Mejora socioeconómica de las áreas rurales, como es el caso de la región Ucayali.

RECOMENDACIONES

- Los recursos potenciales de biomasa calculados en el presente trabajo de investigación superan los 25 MW, considerando un área forestal de 2 000 Ha.
- Las ventajas convierten a la biomasa en una de las fuentes potenciales de empleo en el futuro, siendo un elemento de gran importancia para el equilibrio territorial, en especial en las zonas rurales.
- Se propone la incorporación en la matriz energética de la Región Ucayali el uso de la biomasa como alternativa renovable.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Álvarez, E., et. al. (1993): Principales indicadores de la masa sacrificada de aserrín de pino y su efecto en la alimentación de pollos de ceba, Resúmenes del Primer Taller Internacional Bioforest 93, Pinar del Río.
- Brown, L (1992): La situación en el mundo (Informe Hardwatch) B.A., Sudamericana.
- Comisión de Sur (1991): Desafío para el Sur, Fondo de Cultura Económica, México, pp.11-30.
- Crez, R. (1990): "Utilización de aserrín como aditivo para mejorar la dinámica de los elementos nutritivos en el suelo", 6 Congreso de las ciencias del suelo, Chile, pp.173-176.
- Charkov, V.I. (1972): Química de las Hemicelulosas, Editorial Lesnaya Prom., Moscú.
- Dangler, J.M. (1993): "Lime applications increase extended sweetpotato transplant production in heated beds", Journal of plant nutrition, V 16(11), USA, pp.2281-2288.
- Díaz, A. (1986): Ciencia de la madera, Ministerio de Educación Superior, La Habana, 195 p.
- FAO. (1992): "Productos forestales no madereros; posibilidades futuras", Roma, 36p.
- Jolkin, Y.I. (1989): Tecnología de las producciones hidrolíticas, Editorial Lesnaya Prom, Moscú, 495 p.
- Ladinskaya, S.I. (1987): "Obtención de alimento carbohidratado a partir de residuos de madera", Lesnoi zhurnal, N0 1.
- Noack, D. (1995): "Como aprovechar mejor la madera de los trópicos", OIMT, vol. 3(2).
- Mesa, R. (1994): "Ecología e Impacto Tecnológico, Problemas Sociales de la Ciencia y la Tecnología, Ensayos, Gesocyt, La Habana, pp. 219 – 229.
- Milbocker, D.C. (1991): "Low profile containers for nurse grown trees, HortScience, V 26 (3), USA, pp 261-263.

- Strelski, V.A. (1989): "Ensayo para la obtención de masa forrajera de madera sacarificada", *Guidroliznaya y Lesoj. Prom.*, N0 6.
- Utkin, G.K., et.al (1984): "Obtención de productos de la prehidrólisis de material vegetal", *Información resumen, industria Microbiológica*, Moscú, 38 p.
- Wickens, G.E. (1991): "El desarrollo de los productos forestales no madereros. Principios de ordenación", *Unasyuva* 165, vol. 42(2) pp. 3-8.

ANEXOS

ANEXO 1: Matriz de Consistencia

TÍTULO: “EVALUACIÓN ENERGÉTICA DE LA BIOMASA DE LOS RESIDUOS FORESTALES, COMO ALTERNATIVA DE USO DE ENERGÍA RENOVABLE EN LA CIUDAD DE PUCALLPA – UCAYALI”

MATRIZ DE CONSISTENCIA PARA PROYECTOS DE INVESTIGACIÓN (TESIS)

AUTOR: Augusto Pacaya Villacorta

| TÍTULO | FORMULACIÓN DEL PROBLEMA | OBJETIVOS | HIPÓTESIS | VARIABLES $y = f(x)$ | MEDICIÓN | INDICADORES |
|--|--|--|---|---|---|--|
| "EVALUACIÓN DE LA BIOMASA, COMO ALTERNATIVA ENERGÉTICA RENOVABLE EN LA CIUDAD DE PUCALLPA – UCAYALI. Caso Biomasa del Aserrín" | ¿La cuantificación del potencial energético de la biomasa del aserrín, permitirá su aplicación como alternativa energética renovable en la ciudad Pucallpa – Ucayali?. | OBJETIVO PRINCIPAL: Determinar el potencial energético de la biomasa del aserrín, para su aplicación como alternativa energética renovable en la ciudad de Pucallpa. | HIPOTESIS PRINCIPAL: La determinación del potencial energético de la biomasa del aserrín, implicará conocer la opción de uso como fuente alternativa energética renovable en la ciudad de Pucallpa. | VARIABLE DEPENDIENTE (y): – Potencial Energético | Cuantificar la energía térmica Cuantificar la energía eléctrica | Generación de Vapor ó Calor Generación de Energía |
| | | DEFINICIÓN DEL PROBLEMA: | OBJETIVOS ESPECÍFICOS: | HIPOTESIS ESPECÍFICOS: | | |
| a) Desaprovechamiento del aserrín en las empresas aserradoras de la ciudad de Pucallpa | | <ol style="list-style-type: none"> 1. Focalizar la zona de actividad madera en la ciudad de Pucallpa 2. Identificar el tipo de especie forestal que corresponde la biomasa del aserrín del proceso de la madera 3. Descripción de las características y propiedades físicas, químicas de las especies identificadas 4. Establecer el método para la estimación de la biomasa del aserrín 5. Determinar el potencial energético de la biomasa del aserrín 6. Cuantificar los efectos ambientales del aprovechamiento como alternativa energética renovable de la biomasa del aserrín. | | <ol style="list-style-type: none"> 1. Propiedades de la biomasa del aserrín. 2. Características de la biomasa del aserrín. 3. Especie forestal 4. Volumen de la biomasa del aserrín | Identificar las propiedades físicas y químicas de la biomasa del aserrín Cuantificar la masa de la biomasa por el proceso de aserrío | Humedad Relativa Poder Calorífico Densidad Masa de la Biomasa |
| | | | | VARIABLE INTERVINIENTE: Empresas Aserraderos de Pucallpa | | |