

UNIVERSIDAD DE CIENFUEGOS

“Carlos Rafael Rodríguez.”

Facultad de Ingeniería Mecánica.



Trabajo de Diploma

Título: Diseño de Horno utilizando el principio de la Multitubularidad del combustible sólido.

Autor: Yoslenis de Armas Diaz.

Tutor: Dr. Pedro Fundora Beltrán.

DECLARACION DE AUTORIDAD
UNIVERSIDAD DE CIENFUEGOS



Sistema de Documentación y Proyecto.

Hago constar que el presente trabajo fue realizado en la Universidad de Cienfuegos Carlos Rafael Rodríguez como parte de la culminación de los estudios en la especialidad de Ingeniería Mecánica, autorizando a que el mismo sea utilizado por la Universidad de Cienfuegos para los fines que estime conveniente, ya sea parcial o totalmente, que además no podrá ser presentado sin la aprobación de la Universidad de Cienfuegos.

Firma del autor.

Los abajo firmantes certificamos que el presente trabajo ha sido según acuerdo de la dirección del centro y el mismo cumple los requisitos que debe tener un trabajo de este envergadura, referido a la temática señalada.

Información Científico Técnico

Nombre y Apellidos. Firma.

Vice Decano.

Nombre y Apellidos. Firma.

Firma del Tutor

Nombre y Apellidos. Firma.

Sistema de Documentación y Proyecto.

Nombre y Apellidos. Firma

Pensamiento

“.....del Sol vengo y hacia el Sol voy...”

José Martí

Dedicatoria

Dedicatoria:

Dedico este trabajo a todas aquellas personas que son parte de mi vida desde mi crianza hasta la fecha presente; como aquellos ausentes que no están vigentes físicamente pero se encuentran en mi corazón.

Especialmente: A mis Padres Tías y Abuelos quienes fueron grandes amigos.

A la familia de Armas y los Díaz, por estar siempre a mi lado apoyándome en los momentos más decisivos de mi vida.

Agradecimientos

Agradexo a la Revolución Cubana por haberme dado la oportunidad de estudiar en este bello país a todas las personas que han contribuido en mi formación de una u otra forma y especialmente:

A mi padres Mirian Soc Díaz Ramírez y Orlando de Armas Marrero por haberme dado la vida y su apoyo incondicional.

A mi abuela Luisa de la Caridad por estar siempre a mi lado dándome todo el apoyo y cariño que no se imagina nadie.

A mi hermana y Primos.

A mi tutor Dr. Pedro Fundora Beltrán por su dedicación y apoyo durante el desarrollo de este trabajo.

A todos mis amigos muchas gracias.

Resumen

Resumen:

El presente trabajo se basa en el diseño de un horno de combustión de biomasa para uso industrial. Se hace una evaluación de las tecnologías de combustión y de los combustibles sólidos (Biomosas) y se proponen las modificaciones oportunas. Las respuestas favorables de la combustión de diferentes combustibles sólidos, en la tecnología evaluada, reafirma el criterio de la multitubularidad como una condición indispensable para la gasificación de los combustibles sólidos.

La evaluación precedente junto con otros trabajos de investigación realizados con anterioridad, permitieron crear una Metodología de diseño de gasificadores de biomosas, utilizando el principio de la multitubularidad natural o provocada, en la combustión de lecho fijo de capa gruesa., se parte del modelo físico matemático de comportamiento de la pérdida de masa en el tiempo, de las briquetas tubulares y multitubulares en combustión, fuera de una cámara con registro de la masa por unidad de tiempo. Se demuestra, mediante un ejemplo de cálculo, la factibilidad económica del diseño de un horno gasificador, empleando la metodología creada y los beneficios medioambientales de la misma.

Palabras claves:

Horno, Multitubularidad, Combustión, Combustibles, Biomosas, Diseño.

Summary:

This work is based on the design of a biomass combustion furnace for industrial use. An assessment of combustion technologies for solid fuels (Biomass) is made and propose appropriate amendments. Favorable responses from the combustion of various solid fuels, technology evaluated reaffirms the multitubularidad criteria as a prerequisite for the gasification of solid fuels. The previous evaluation along with other research previously performed, allowed to create a design methodology biomass gasifiers, using the principle of natural or induced multitubularidad in fixed bed combustion thick. Is part of the physical model mathematical behavior of mass loss over time, of the tubular combustion multitubular briquettes and outside a camera recording the mass per unit time. It is demonstrated by an example calculation, the economic feasibility of the design of a meltergasifier, using the methodology developed and environmental benefits of it.

Keywords:

Oven, Multitubularidad, Combustion, Fuels, Biomass, Design.

Índice

Contenido

1. Introducción.....	2
Capítulo 1: Estado documental del uso energético de la biomasa.	4
1- Introducción.....	5
1.1 Uso histórico de la biomasa como combustible.	5
1.2 Utilización de la biomasa.	8
1.3 La biomasa como fuente de energía.	10
1.4 El Recurso biomásico.	11
1.5 Algunas características de la biomasa.....	12
1.6 Situación mundial de la biomasa.	14
1.6.1 Biomasa - Algunos datos básicos.	14
1.7 Aplicaciones.....	15
1.8 Métodos de conversión de la biomasa.....	17
1.9 Proceso de combustión.	19
1.10 Ventajas y desventajas del aprovechamiento de la biomasa.....	23
1.10.1 Ventajas.....	23
1.10.2 Desventajas.	23
1.11 Estado del arte.....	24
1.11.1 Problemas asociados con la utilización de la biomasa como combustible.	24
1.11.2 Modelos de combustión de sólidos.	25
1.12 Proceso de combustión de los combustibles sólidos.....	25
1.13 Gasificación.	27
1.13.1 Diferencia entre gasificación y combustión.....	28
1.13.2 Gasificador.....	28
1.13.3 Proceso de gasificación.....	29
1.13.4 Termoquímica del proceso de gasificación.....	29

1.13.5 Tipos de gasificadores.....	31
1.14 Tipos de horno.....	32
1.14.1 Selección del tipo de horno para el bagazo de caña.	32
1.14.2. Selección del tipo de horno para la cascarilla de arroz.....	35
1.14.3 Selección del tipo del horno para la cascarilla de café.	37
Conclusiones parciales:	39
Capítulo 2: Estudio del proceso de combustión gasificación utilizando el principio de la multitubularidad natural o provocada.....	40
2.2Diseño de experimento para determinar la influencia de la tubularidad y multitubularidad de las briquetas de diferentes biomاسas, en los índices fundamentales de combustión que posibilitan caracterizar la calida térmica de las mismas.....	42
2.2.1 Resultados del procesamiento estadístico de los diferentes factores independientes con los factores de respuestas.	44
2.2.2 - Análisis de los resultados.	44
2.3Índice de transformación de las biomاسas o grado de transformación de las biomاسas en biogás, durante el proceso de gasificación.....	46
2.3.1Gasificación de las biomاسas en la combustión, multitubularidad provocada.	46
2.3.2 Determinación del índice de transformación de las biomاسas en el proceso de gasificación (ψ).	47
Conclusiones parciales	60
Capítulo 3: Metodología de diseño de hornos gasificadores de biomasa, utilizando el principio de la multitubularidad natural o provocada.....	61
Metodología de diseño de hornos gasificadores de biomasa, utilizando el principio de la multitubularidad natural o provocada.....	61
3. Introducción	62
3.1Dimensionado preliminar de una cámara de combustión con sus dispositivos de gasificación-combustión.....	63
3.1.1Dimensionamiento de la Cámara de Combustión.....	63
3.1.2Forma geométrica de la Cámara de Combustión.	63
3.1.3Metodología para el dimensionado de la cámara de combustión y dispositivos de gasificación.....	66
3.2Diseño del horno gasificador biomasa como combustible fundamental.	67
3.2.1Principio de la macro multitubularidad.	67
3.3Calculo del número de gasificadores y del área perimetral de un gasificador. (Para 1Mw de potencia).....	67
3.3.1Área perimetral de un gasificador.	67

3.3.2	Calculo de (ICP) total.....	67
3.3.3	Utilizando la ecuación para (biomasa leñosa).	68
3.3.4	Hallar el número de gasificadores.	68
3.3.5	Diámetro de la cámara de combustión	68
3.3.6	Cálculo del área de gasificación.	69
3.3.7	Área total del Horno	69
3.3.8	Aire secundario.....	69
3.3.9	-Aire terciario	69
3.4	Calculo de la masa de combustible.	71
3.5	Cálculo de la Energía del proceso de gasificación.	71
	Conclusiones parciales:	73
Capítulo 4: Análisis preliminar del costo del horno de gasificación.		74
	Análisis preliminar del costo del horno de gasificación.....	74
4.1	Análisis económico.	75
4.2	Costo de materiales.	75
4.2.1	Costos de materiales auxiliares.	76
4.3	Gasto en salario.....	77
4.4	Gasto generado por la amortización de los equipos.....	78
4.5	Costo por el consumo de energía eléctrica.....	79
4.6	Total de gastos directos.....	79
4.7	Total de gastos indirectos.	80
4.8	Costo total de fabricación del horno.	80
	Conclusiones Generales:.....	82
	Recomendaciones:	84
Bibliografía:		86
ANEXO		88

Introducción

1. Introducción

Antecedentes

La búsqueda de la felicidad es un común denominador en los seres humanos. Guiados por este deseo, creamos nuevas tecnologías y perfeccionamos, las técnicas existentes hasta alcanzar grados extraordinarios de sofisticación en el consumo de bienes. Sin embargo, pese a la increíble ampulosidad de nuestra sociedad, creo que existe un descontento generalizado en el ámbito individual. Tener más, ganar más, necesitar más y ser mejores, más famosos, más brillantes y tener más éxito que los demás son solo intentos superficiales de lograr la felicidad. Estas diferencias sociales crean un abismo, cada vez más profundo, entre las personas. Además, nuestra sociedad está amenazando gravemente el planeta y envenenando con rapidez el medio ambiente.

En el 2007, como parte de los Programas de la Revolución Energética, el Gobierno cubano se formuló una iniciativa para el aprovechamiento de las fuentes renovables de energía, con el objetivo de asegurar un adecuado y sostenible suministro de energía, reducir las emisiones de gases del efecto invernadero y garantizar el continuo crecimiento económico del país.

En Cuba, las principales fuentes renovables de energía en explotación se encuentran concentradas en la biomasa (bagazo, leñas combustibles y el biogás) (96,42%), seguido por la energía hidroeléctrica (3,22%), y en menores proporciones la energía solar (0,24 %) y la energía eólica (0,12%), respectivamente. La cantidad total de energía renovable estimada de la biomasa, la hidroenergía, la solar y la eólica presenta un valor de 187 882 t equivalentes, lo cual es casi el 5 % de la producción cubana de petróleo crudo en el 2006.

La biomasa constituye algo más del 96 % de la energía renovable total en Cuba, y continuará dominando en el futuro, debido a las grandes cantidades de residuos de las industrias de agroforestales como las del azúcar, la madera, el café, el arroz y otras fuentes como las leñas, el biogás y las plantaciones de oleaginosas no comestibles.

Esto subraya la importancia del trabajo encaminado al total aprovechamiento energético y uso de biomasa, como el aserrín y la paja de caña, densificados en

forma de briquetas. Para lo cual se hace necesario realizar un estudio de estas biomásas para analizar su comportamiento en la combustión, razón por lo cual se ha encaminará este trabajo en tal sentido, proponiendo como:

Problema de Investigación

En las referencias bibliográficas encontradas no se declare explícitamente la utilización del principio de la Multitubularidad en el diseño de tecnología de combustión en hornos.

Hipótesis:

Con la aplicación de la metodología que toma en cuenta el principio de la multitubularidad, se pueden realizar diseños de hornos, que aseguren elevada eficiencia en la combustión y por consiguiente un aprovechamiento racional del combustible sólido (Biomásas), reduciendo con ello, el impacto medio ambiental.

Objetivos Generales:

Diseñar un horno para la combustión de biomasa, utilizando la metodología que relaciona la geometría de la cámara de combustión, forma de colocación del combustible con la gasificación y combustión del combustible (Principio de multitubularidad).

Objetivos Específicos:

- 1) Revisión y resumen bibliográfico referente a las biomásas y a sus potencialidades como combustibles y a los diferentes tipos de hornos.
- 2) Aplicación de la metodología del principio de multitubularidad para briquetas tubulares y multitubulares y para pilas de combustibles sin densificar, con multitubularidad provocada.
- 3) Diseñar un horno para combustión de biomasa o briquetas para uso industrial con potencia térmica entre 1 y 5 MW.
- 4) Determinar el costo preliminar del horno diseñado.

Capítulo 1

Estado documental del uso energético de la biomasa.

1- Introducción.

1.1 Uso histórico de la biomasa como combustible.

Se incluye dentro del término “biomasa” a todo material biológico, excluido aquel que se localiza dentro de formaciones geológicas, haya sufrido o no un proceso de mineralización.

De acuerdo a dicha definición, todos los productos que componen la biomasa provienen de la energía solar que, mediante el proceso de fotosíntesis llevado a cabo por las plantas verdes, se ha captado y transformado en energía del enlace químico de las moléculas que componen la materia orgánica de la que están formados los materiales biológicos. Esta energía solar así transformada se libera en forma de energía utilizable en los procesos de oxidación que se producen en los procesos de conversión energética de los materiales biomásicos.

1.1. Utilización de la biomasa

Desde tiempos inmemoriales, el hombre comenzó a utilizar la biomasa como fuente energética, en los comienzos el primer combustible fue precisamente la biomasa que producto de los fenómenos atmosféricos ardía y el hombre utilizaba el fuego para calentarse y cocinarse los alimentos.

Con el desarrollo de la humanidad la biomasa continúa como un combustible de elección en todos los pueblos. Producto de la revolución industrial y el surgimiento de la máquina de vapor, la combustión de biomasa comenzó a utilizarse para generar energía mecánica. Con el desarrollo de las tecnologías para explotar los combustibles fósiles convencionales, la combustión de biomasa se vio reducida su uso.

La biomasa, en forma de lo que se conoce genéricamente como “leña” o “madera”, ha sido el primer y casi único recurso energético utilizado por el hombre hasta el advenimiento del carbón y después fue la principal energía hasta principios de la era industrial, a comienzos del siglo XIX. Aún en nuestros días la biomasa sigue constituyendo una de las principales fuentes energéticas de la humanidad y en los últimos sesenta años a su uso tradicional para producción de calor se han unido aplicaciones eléctricas y de combustibles de transporte (Carrasco, 2008).

La biomasa representa aproximadamente de toda la energía que se consume en los países en vías de desarrollo y casi el 90 % de algunos de los países desarrollados. Más de 2 mil millones de personas siguen contando con combustibles de la biomasa y las tecnologías tradicionales para cocinar y como calefacción. Entre 1,5 y 2,0 mil millones personas no tienen acceso a la electricidad.

Los combustibles biomásicos usados hoy en los países en desarrollo han sido llamados "el petróleo del hombre pobre" debido al uso directo para la combustión en la cocina doméstica. La biomasa puede ser llamada más apropiadamente "el petróleo de la mujer pobre" ya que la mujer y los niños en las áreas rurales gastan una considerable cantidad de tiempo colectando madera combustible y sufriendo el ambiente de la polución del aire interior causado por la combustión de la biomasa para calentar y cocinar.

La utilización de biomasa en países en desarrollo contrasta significativamente con la biomasa usada en los países industrializados. Como promedio, la biomasa registra de 3 a 4 % del uso total de energía en estos últimos, aunque en países con políticas de apoyo del uso de la biomasa, (por ejemplo: Suecia, Finlandia y Austria), los valores alcanzan del 15 al 20 %. La mayor parte de la biomasa en los países industrializados es convertida en electricidad y procesos de calentamiento en sistemas de cogeneración (combinando calor y producción de potencia), en sitios industriales o distritos municipales con facilidades de calentamiento. Ambas producen una gran variedad de servicios de energía derivadas de la biomasa y resulta una mayor limpieza y uso más eficiente de los recursos de biomasa disponibles que los usos tradicionales de bioenergía en países en desarrollo.

Otro caso es el de los Estados Unidos que tienen alrededor de 8 000 MW de capacidad instalada de generación de electricidad con biomasa combustible, principalmente como sistemas de producción de potencia y calor combinado. Los residuos de procesos industriales son los principales combustibles de biomasa usados en los países industrializados.

A partir de la década de los 80 comenzó a notarse en el planeta cambios globales producidos por la contaminación al medio, la mayor parte de esa contaminación es

debido a la producción de electricidad en plantas que utilizan para la generación combustibles fósiles los cuales; como resultado de su combustión; emiten a la atmosfera la mayor cantidad de CO₂, NO_x, SO_x, vapores de agua y otros contaminantes.

Es por ello que se comenzó a pensar en otros tipos de combustibles que pudieran sustituir a los combustibles fósiles; que por demás sus reservas son limitadas; y que su influencia sobre el medio ambiente fuera menor o mínima, es a partir de aquí que se comienza a hablar de fuentes renovables de energía y de tecnologías alternativas.

Los recursos naturales renovables son aquellos que, tras ser utilizados, pueden regenerarse natural o artificialmente, como el agua o los alimentos. Son recursos que, al estar sometidos a ciclos, se mantienen de forma más o menos constante en la naturaleza. En la era contemporánea la necesidad de disponer de fuentes de energía aprovechables se ha convertido en algo imprescindible para el ser humano. Basta pensar en el consumo energético que una persona común realiza al día para darse cuenta de la dependencia existente. El gas empleado para calentar el agua y para la calefacción, la gasolina que mueve los coches, aviones y trenes, la electricidad, que entre otros usos, ilumina las casas, permite que suenen las radios y se vea la televisión, son fuentes de energía que se emplean en la actualidad y que constituyen uno de los pilares de la civilización. Sin ellas no funcionarían los aparatos empleados por el hombre en su vida cotidiana.

Se calcula que las reservas de fuentes de energía convencionales existentes en la Tierra pueden durar todavía varios cientos de años. Esto implica que una crisis energética real de ausencia de estos productos, que tendría consecuencias catastróficas para la humanidad, no se va a producir durante, al menos, unas décadas; no obstante, la extracción de esta energía es cada vez más cara. Los pozos de carbón y petróleo deben perforarse cada vez más profundos, lo que dispara los costes de dichas materias. Las centrales nucleares dan resultados inferiores a los esperados; además, el coste de purificación del uranio que estas necesitan para trabajar es muy elevado.

A la vista de estos inconvenientes, los distintos gobiernos del mundo han puesto en marcha, a partir de la crisis del petróleo de 1973, diversos proyectos de investigación sobre otras fuentes de energía que puedan resultar rentables cuando el coste de las fuentes tradicionales aumente. Estas nuevas energías son las denominadas alternativas renovables.

Los principales recursos energéticos que se utilizan (el carbón, el petróleo, el gas natural y el uranio) son limitados y, por tanto, pueden agotarse. Además, su utilización provoca un gran impacto ambiental en la biosfera al contaminar el aire, el agua y el suelo. Estos hechos han generado un interés creciente por el desarrollo de nuevas tecnologías para la utilización de fuentes de energía renovables alternativas que, aunque actualmente son poco rentables, tienen la ventaja de ser poco contaminantes (Collectiveauthors, 1995).

1.2 Utilización de la biomasa.

Plantaciones Energéticas.- Estas son grandes plantaciones de árboles o plantas cultivadas con el fin específico de producir energía. Para ello se seleccionan árboles o plantas de crecimiento rápido y bajo mantenimiento, las cuales usualmente se cultivan en tierras de bajo valor productivo. Su período de cosecha varía entre los tres y diez años (Collectiveauthors, 1995).

También se utilizan arbustos que pueden ser podados varias veces durante su crecimiento, para extender la capacidad de cosecha de la plantación. Igualmente, se pueden usar plantas oleaginosas como Palma de aceite, Girasol o Soya y algunas plantas acuáticas como Jacinto de agua (*Nimphaeasp.*) o las algas, para producir combustibles líquidos como el Etanol y el Biodiesel.

Adicionalmente, este tipo de cultivos sirve para controlar la erosión y la degradación de los suelos y puede proveer otros beneficios a los agricultores desde el punto de vista económico.

La principal limitante para este tipo de plantaciones está en la escala pues se requieren grandes extensiones de tierra para lograr una producción de energía rentable. Por esta razón, son factibles cuando se desarrollan con algún tipo de producción agrícola paralela, como por ejemplo, el maíz, la caña de azúcar y la palma de aceite.

Residuos forestales.- Son una importante fuente de biomasa que actualmente es poco explotada en el área centroamericana. Se considera que de cada árbol extraído para la producción maderera, solo se aprovecha comercialmente el 20%, mientras que un 40% es dejado en el campo, en las ramas y raíces, a pesar de que el potencial energético es mucho mayor, y otro 40% en el proceso de aserrío, en forma de astillas, corteza y aserrín(Belo,2014).

Los desechos de campo, en algunos casos, son usados como fuente de energía por comunidades aledañas, pero la mayor parte no se aprovecha por el alto costo del transporte.

Desechos agrícolas.- La agricultura genera cantidades considerables de desechos (rastros), el estimado es que, en cuanto a desechos de campo, el porcentaje es más del 60%, y en desechos de proceso, entre 20 y 40%.

Al igual que en la industria forestal, muchos residuos son dejados en el campo, aunque es necesario reciclar un porcentaje de biomasa, para proteger al suelo de la erosión y mantener el nivel de nutrientes orgánicos, una cantidad importante puede ser recolectada para la producción de energía. Ejemplos comunes de este tipo de residuos son el maíz, el café y la caña de azúcar. Los campos agrícolas también son una fuente importante de leña para uso doméstico.

Por otro lado, las granjas producen un elevado volumen de “residuos húmedos” en forma de estiércol de animales. La forma común de tratar estos residuos es esparciéndolos en los campos de cultivo, con el doble interés de disponer de ellos y obtener beneficios de su valor nutritivo. Esta práctica puede provocar una sobre fertilización de los suelos y la contaminación de las cuencas hidrográficas.

Desechos industriales.- La industria alimenticia genera una gran cantidad de residuos y subproductos, que pueden ser usados como fuentes de energía, los provenientes de todo tipo de carne (avícola, vacuna, porcina) y vegetales (cáscaras, pulpas) cuyo tratamiento como desechos representan un costo considerable para la industria. Estos residuos son sólidos y líquidos con un alto contenido de azúcares y carbohidratos, los cuales pueden ser convertidos en combustibles gaseosos.

Desechos urbanos.- Los centros urbanos generan una gran cantidad de biomasa en muchas formas, por ejemplo: residuos alimenticios, papel, cartón, madera y aguas negras. La mayoría de los países centroamericanos carecen de sistemas adecuados para su procesamiento, lo cual genera grandes problemas de contaminación de suelos y cuencas, sobre todo por la inadecuada disposición de la basura y por sistemas de recolección y tratamiento con costos elevados de operación.

Por otro lado, la basura orgánica en descomposición produce compuestos volátiles (metano, dióxido de carbono, entre otros) que contribuyen a aumentar el efecto invernadero. Estos compuestos tienen un considerable valor energético que puede ser utilizado para la generación de energía “limpia”.

A corto y mediano plazo, la planificación urbana debe incluir sistemas de tratamiento de desechos que disminuyan eficazmente las emanaciones nocivas de los desechos al ambiente, dándoles un valor de retorno por medio del aprovechamiento de su contenido, pues aproximadamente el 80% de toda la basura orgánica urbana puede ser convertida en energía.

1.3 La biomasa como fuente de energía.

Para la mayoría de la población mundial, las formas más familiares de energía renovable son las que provienen del sol y del viento. Sin embargo existen otras fuentes de biomasa, como leña, carbón de leño, cascarilla de arroz, que proveen un alto porcentaje de la energía consumida en el mundo y tienen potencial para suplir mayores volúmenes.

El término biomasa se refiere a todo material biológico, excluido aquel que se localiza dentro de formaciones geológicas, que haya sufrido o no un proceso de mineralización y que pueden ser convertidos en energía.

Esta es la fuente de energía renovable más antigua conocida por el ser humano, pues ha sido usada desde que nuestros ancestros descubrieron el secreto del fuego. Desde el pre historia, la forma más común de utilizar la energía de la biomasa ha sido la combustión directa: quemándola en hogueras a cielo abierto,

en hornos y cocinas de calefacción, cocción de alimentos, producción de vapor y generación de electricidad.

Los avances tecnológicos han permitido el desarrollo de procesos más eficientes y limpios para la conversión de la biomasa en energía, transformándola, por ejemplo, en combustibles líquidos y gaseosos, los cuales son más convenientes y eficientes. Así aparte de la combustión directa se pueden distinguir otros dos tipos de procesos: el termoquímico y el bioquímico. Las denominadas “granjas energéticas” pueden suplir un porcentaje significativo de los requerimientos energéticos mundiales y, al mismo tiempo, revitalizar las economías rurales, produciendo energía en forma independiente y segura y logrando importantes beneficios ambientales. Las comunidades rurales podrán ser, entonces, energéticamente auto suficientes en un alto grado, a partir del uso racional de los residuos y administrando inteligentemente la biomasa disponible en la localidad (Mencia, 2011).

Actualmente los procesos modernos de conversión solamente suplen 5% del consumo de energía en países industrializados. Sin embargo, gran parte de la población rural en los países subdesarrollados que representa cerca del 50% de la población mundial, aún depende de la biomasa tradicional, principalmente de leña, como fuente de energía primaria. Esta supe, aproximadamente el 35% del consumo de energía primaria en países subdesarrollados y alcanza un 15% del total de la energía consumida en el nivel mundial.

1.4 El Recurso biomásico.

Se considera que la biomasa es una fuente renovable de energía porque su valor proviene del sol. A través del proceso de fotosíntesis, la clorofila de las plantas captura su energía y convierte el dióxido de carbono (CO_2) del aire y el agua del suelo en carbohidratos, para formar la materia orgánica. Cuando estos carbohidratos se queman, regresan a su forma de dióxido de carbono y agua liberando la energía que contienen. De esta forma, la biomasa funciona como una especie de batería que almacena la energía solar. Entonces se produce en forma sostenida, o sea, en el mismo nivel en que se consume, esta batería durará indefinidamente.

Los recursos biomásicos incluyen cualquier fuente de materia orgánica, como desechos agrícolas y forestales, plantas acuáticas, desechos animales y basura urbana. Su disponibilidad varía de región a región, de acuerdo con el clima, el tipo de suelo, la geografía, la densidad de la población, las actividades productivas, etc.; por eso, los correspondientes aspectos de infraestructura, manejo y recolección del material deben adaptarse a las condiciones específicas del proceso en el que se deseen explotar (Mencía, 2011).

Los factores que condicionan el consumo de biomasa en la actualidad son:

Factores geográficos: debido a las condiciones climáticas de cada región, las cuales indicarán las necesidades de calor que requiera cada zona, y las cuales podrán ser cubiertas con biomasa.

Factores energéticos: por la rentabilidad o no de la biomasa como recurso energético. Esto dependerá de los precios y del mercado energético en cada momento.

Disponibilidad del recurso: este es el factor que hay que estudiar en primer lugar para determinar el acceso y la temporalidad del recurso.

1.5 Algunas características de la biomasa.

Para evaluar la factibilidad técnica y económica de un proceso de conversión de biomasa en energía, es necesario considerar ciertos parámetros y condiciones que la caracterizan. Estos que se explican a continuación, determinan el proceso de conversión más adecuado y permiten realizar proyecciones de los beneficios económicos y ambientales esperados (Mencía, 2011).

Composición Química y física.- Estas características determinan el tipo de combustible o subproducto energético que se puede generar, por ejemplo, los desechos animales producen altas cantidades de metano, mientras que la madera puede producir el denominado “gas pobre”, que es una mezcla rica en monóxido de carbono (CO). Por otra parte, las características físicas influyen en el tratamiento previo que sea necesario aplicar.

Contenido de humedad (HR).- Es la relación de la masa de agua contenida por kilogramo de materia seca. Para la mayoría de los procesos de conversión energética es imprescindible que la biomasa tenga un contenido de humedad

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

Porcentaje de cenizas.- Indica la cantidad de materia sólida no combustible por kilogramo de material. En los procesos que incluyen la combustión de la biomasa, es importante conocer el porcentaje de generación de ceniza y su composición, pues, en algunos casos, esta puede ser utilizada; por ejemplo, la ceniza de la cascarilla de arroz es un excelente aditivo en la mezcla de concreto o para la fabricación de filtros de carbón activado.

Poder calórico.- El contenido calórico por unidad de masa es el parámetro que determina la energía disponible en la biomasa. Su poder calórico está relacionado directamente con su contenido de humedad. Un elevado porcentaje de humedad reduce la eficiencia de la combustión debido a que una gran parte del calor liberado se usa para evaporar el agua y no se aprovecha en la reducción química del material.

Densidad aparente.- Esta se define como el peso por unidad de volumen del material en el estado físico presentado, bajo condiciones dadas. Combustibles con alta densidad aparente favorecen la relación de energía por unidad de volumen, requiriéndose menores tamaños de los equipos y aumentando los periodos entre cargas. Por otra parte, materiales con baja densidad necesitan mayor volumen de almacenamiento y transporte y, algunas veces, presentan problemas para fluir por gravedad, lo cual complica el proceso de combustión y eleva los costos del proceso.

Recolección, transporte y manejo.- Estos son factores determinantes en la estructura de costos de inversión y operación en todo proceso de conversión energética. La ubicación del material con respecto a la planta de procesamiento y la distancia hasta el punto de utilización de la energía convertida, deben analizarse detalladamente para lograr un nivel de operación del sistema por encima del punto de equilibrio, con relación al proceso convencional.

1.6 Situación mundial de la biomasa.

Más de 2 mil millones de personas siguen contando con combustibles de la biomasa y las tecnologías tradicionales para cocinar y como calefacción. Entre 1,5 y 2,0 mil millones de personas no tienen acceso a la electricidad. La baja eficiencia actual del uso de la biomasa significa que aunque esta, se consume globalmente en una proporción alta, produce sólo un nivel bajo de servicios de energía. En todas sus formas, actualmente la biomasa provee una cantidad aproximada de 1250 millones de toneladas equivalente de petróleo (Tep), lo que representa casi el 14% del consumo anual de energía mundial. Incluso en los países desarrollados, la biomasa se está utilizando cada vez más. En varios de los países desarrollados el uso de esta fuente se ha incrementado sustancialmente, por ejemplo, en Suecia y Austria, el 15% del consumo de energía primaria está cubierta por la biomasa. Suecia tiene planes para aumentar el uso adicional de la biomasa, y entrar en fase de remplazo de las plantas nucleares y de combustibles fósiles. La utilización de la biomasa sustituye parcialmente a los combustibles fósiles y tiene una importancia adicional atendiendo a las preocupaciones del calentamiento global, ya que la combustión de la biomasa tiene el potencial de tener el CO₂ neutral. La biomasa es la mayor fuente de energía de los países en vía de desarrollo, donde se proporciona el 35% de todos los requerimientos de energía. Los combustibles biomásicos utilizados hoy en los países en desarrollo han sido llamados “El petróleo del hombre pobre” debido al uso directo de la combustión en la cocina doméstica. La biomasa puede ser llamada más apropiadamente “El petróleo de la mujer pobre” ya que esta, junto a los niños en las áreas rurales, gastan cantidad de tiempo colectando madera combustible y sufriendo el ambiente de la polución del aire interior causado por la combustión de la biomasa para calentar y cocinar (Mencia, 2011).

1.6.1 Biomasa - Algunos datos básicos.

El contenido total de la biomasa del mundo - 1880 billones de toneladas.

Masa total en los bosques tropicales - 1,03 billones toneladas.

Masa total en los bosques templados, sabana y la tundra - 790 billones de toneladas.

El contenido total de la biomasa marina - 4 billones de toneladas.

Per cápita de biomasa terrestre - 310 toneladas.

Energía almacenada en la biomasa terrestre - 25 000 EJ.

La producción neta anual de la biomasa terrestre - 400 billones de toneladas.

Cambio de almacenamiento de energía por biomasa de la tierra - 3000 EJ / año (95 TW).

El consumo total de todas las formas de energía - 400 EJ / año (12 TW).

El consumo de energía de la biomasa - 55 EJ / año (1.7 TW).

En cuanto a las perspectivas del uso de los combustibles biomásicos hay que destacar que además de las ventajas energéticas que supone, el desarrollo de sector puede tener unas repercusiones muy favorables en otros campos. El aspecto medioambiental es uno de lo más importante. La reducción de emisiones contaminantes (CO₂, NO_x, SO₂) a la atmósfera es uno de los objetivos primordiales. Por otra parte, el aprovechamiento energético de los residuos forestales puede contribuir a reducir los costes de la limpieza de los bosques.

La utilización de los cultivos energéticos también cuenta con un gran potencial de desarrollo en determinadas regiones de Europa al igual que el aprovechamiento energético del biogás generado en la digestión anaerobia de los residuos ganaderos y los lodos de depuración de aguas urbanas.

1.7 Aplicaciones.

La gran variedad de biomásas existentes unida al desarrollo de distintas tecnologías de transformación de ésta en energía (Combustión directa, Pirolisis, Gasificación, Fermentación, Digestión anaeróbica,...) permiten plantear una gran cantidad de posibles aplicaciones entre las que destacan la producción de energía térmica, electricidad (Belo, 2014).

Producción de Energía Térmica

Aprovechamiento convencional de la biomasa natural y residual. Los sistemas de combustión directa son aplicados para generar calor, el cual puede ser utilizado directamente, como por ejemplo, para la cocción de alimentos o para el secado de

productos agrícolas. Además, éste se puede aprovechar en la producción de vapor para procesos industriales y electricidad.

Los procesos tradicionales de este tipo, generalmente, son muy ineficientes porque mucha de la energía liberada se desperdicia y pueden causar contaminación cuando no se realizan bajo condiciones controladas.

Producción de Energía Eléctrica

Obtenida minoritariamente a partir de biomasa residual (restos de cosecha y poda) y principalmente a partir de cultivos energéticos leñosos, de crecimiento rápido (Chopo, Sauce, Eucalipto, Robinia, Coníferas, Acacia, Plátano,...) y herbáceos (Cardo lleno, Miscanto, Caña de Provenza, Euforbios, Chumberas,...). También se utiliza el biogás resultante de la fermentación de ciertos residuos (lodos de depuradora, Residuos Sólidos Urbanos...) para generar electricidad.

Una posibilidad de incrementar el rendimiento energético en el uso de la biomasa es la cogeneración de calor y electricidad. La gasificación es una alternativa con mejores rendimientos que la combustión en calderas. El empleo de motores diesel o de turbinas de gas para quemar el gas producido puede elevar el rendimiento a valores por encima del 30%, sin embargo ésta es una opción poco extendida.

Producción de Biocombustibles

Los biocombustibles han dejado de ser una fantasía, para convertirse en una realidad. Ya es común ver automóviles que funcionan con estos biocombustibles. En Brasil, por ejemplo, hay unos 2.000.000 de vehículos que se mueven con alcohol casi puro, el cual se obtiene de la caña de azúcar, y 8.000.000 más utilizan una mezcla de gasolina y alcohol. Este alcohol se realiza a partir de melazas de caña de azúcar o de la pulpa de mandioca, para ser utilizado como combustible. Gran parte del etanol se mezcla con gasolina, y constituye el 20 % del combustible que utilizan los automóviles, con el consiguiente ahorro de energía fósil (gasolina). Básicamente se trabaja en dos alternativas comerciales: el biodiesel y el bioalcohol.

Producción de gases combustibles

Es una aplicación poco utilizada actualmente que consiste en la descomposición de la biomasa en un digestor para obtener un gas, cuyo compuesto combustible

es básicamente metano, pero también contienen nitrógeno, vapor de agua y compuestos orgánicos. El proceso es adecuado para tratar biomasa de elevado contenido en humedad y poco interesante en otras aplicaciones, bien por su calidad o por la poca cantidad disponible.

Otra posibilidad para la producción de gas es el empleo de un gasificador, que inyecta aire u oxígeno y vapor de agua. Opera a elevada temperatura, entre 800 y 1200°C, con lo cual la cinética de las reacciones es más alta. El gas contiene CO, H₂, pequeñas concentraciones de metano, nitrógeno y vapor de agua. Tiene un poder calorífico medio. Existen varias alternativas de gasificación; el lecho fijo sirve para tratar pequeñas cantidades de biomasa, mientras que los de lecho fluido tratan mayores cantidades, siendo éstos utilizados para la generación de electricidad.

Al problema operativo de la gasificación, se une el de la producción de alquitranes y otros compuestos orgánicos pesados. Esto hace posible la combustión del gas en equipos industriales, calderas y hornos o en motores diesel para generación eléctrica, pero dificulta la extensión a turbinas de gas en sistemas eléctricos de alta eficiencia. La alternativa es purificar el gas, pero es caro.

1.8 Métodos de conversión de la biomasa.

El término es utilizado con mayor frecuencia en las discusiones relativas a la energía de biomasa, es decir, al combustible energético que se obtiene directa o indirectamente de recursos biológicos. La energía de biomasa que procede de la madera, residuos agrícolas y estiércol, continúa siendo la fuente principal de energía de las zonas en desarrollo. En algunos casos también es el recurso económico más importante, como en Brasil, donde la caña de azúcar se transforma en etanol, y en la provincia de Sichuan, en China, donde se obtiene gas a partir de estiércol. Existen varios proyectos de investigación que pretenden conseguir un desarrollo mayor de la energía de biomasa, sin embargo, la rivalidad económica que plantea con el petróleo es responsable de que dichos esfuerzos se hallen aún en una fase temprana de desarrollo. (Belo, 2014)

La biomasa se puede clasificar en:

Biomasa natural: Es la que se produce en los ecosistemas naturales. Se debe señalar que la presión que se ejerza sobre esta debe ser menor que la capacidad de regeneración del ecosistema. Este tipo de biomasa en la actualidad es una fuente de gran importancia en ciertas zonas rurales y en países en vías de desarrollo.

Biomasa residual: Estos son generados por la actividad humana (residuos o sub-productos) en actividades agrícolas, ganaderas y forestales.

Cultivos energéticos: Estos se realizan con el uso exclusivo de obtener materiales destinados a su aprovechamiento energético. Las características más relevantes son: su alta producción por unidad de superficie, año y la limitación de los cuidados al cultivo.

La gran variedad de materiales diferentes incluidos dentro del concepto de biomasa permite a su vez plantear una gran cantidad de posibles aplicaciones que únicamente tienen en común la combustión final de la misma, la cual puede ser aprovechada en forma sólida, líquida o gaseosa.

Como forma de utilización se puede ver que la biomasa sólida se puede utilizar para aplicaciones térmicas, la líquida como combustible en motores de vehículos y los gaseosos a la producción de electricidad en sistemas de cogeneración.

Las aplicaciones actuales de la biomasa están muy ligadas a la realización de procesos previos entre los cuales se encuentra:

Homogenización: Por su propia naturaleza esta presenta características muy heterogéneas, por lo que se supone la adecuación de la biomasa a condiciones de granulometría, humedad, composición todo esto logrado por procesos de trituración, astillado y secado.

Densificación: Mejora de las condiciones de la biomasa mediante briqueteado o pelletizado, consiguiéndose combustibles con un alto peso específico, lo que mejora las características de almacenamiento y transporte.

Entre los aprovechamientos de la misma se pueden señalar los siguientes:

Combustión directa: Es la combustión de la biomasa en hogares, que va desde chimeneas hasta grandes calderas de lecho fluidizado.

Obtención de productos por vía termoquímica: Al someter la biomasa a determinadas transformaciones de presión y temperatura con el fin de obtener productos sólidos, líquidos y gaseosos en dependencia del tipo de aplicación: los productos sólidos: Carbón vegetal y los gaseosos: gasógeno.

Derivados obtenidos por vía bioquímica: Consta de dos vías de obtención, la primera es la fermentación anaerobia de los residuos biodegradables que permite la formación de biogás como subproducto resultante de los procesos de mejora ambiental para reducir la carga contaminante de dichos residuos. Por otra parte, la obtención de alcoholes (principalmente etanol) mediante la fermentación alcohólica de ciertos materiales que pueden ser a partir de la producción de bioalcoholes (etanol) a partir de materiales azucarados o amiláceos sólido presenta ventajas de manejo y aplicación como son:

Dentro de los aspectos medioambientales la principal ventaja es su carácter de fuente energética renovable, también presenta un balance de CO₂ neutro, por lo que no contribuye al incremento de la proporción de CO₂ a la atmósfera.

La combustión de biomasa, ya que su composición no incluye Azufre o Cloro, siempre que se realice adecuadamente no produce compuestos tóxicos ni que produzcan las llamadas lluvias ácidas, además las cenizas producidas por su combustión pueden ser utilizadas como fertilizantes naturales y no requiere de actividades que provoquen impactos ambientales graves ni accidentes en su manipulación, almacenamiento o transportación (Grozdila, 1997).

1.9 Proceso de combustión.

La combustión de la biomasa, al igual que otros combustibles, depende fundamentalmente del proceso previo de pirólisis, que tiene lugar alrededor de los 250°C. La pirólisis se define como la ruptura térmica de los componentes iniciales del combustible dando como resultado fracciones volátiles y carbono fijo. Los componentes volátiles se queman formando una llama, mientras que la combustión del carbono fijo tiene lugar superficialmente, en forma de fracciones sólidas incandescentes. Ambos tipos coexisten en un proceso de combustión de biomasa. La forma y el tamaño del combustible poseen una importante incidencia en el desarrollo del proceso de pirolisis (Ortiz, 1996).

El proceso de combustión de una partícula biomásica de combustible se puede dividir en tres fases:

Durante la primera fase recibe el calor del entorno transfiriéndose hacia su interior por conducción, lo que provoca el aumento de la temperatura. Cuando se alcanzan los 100°C, comienza el proceso de secado que es endotérmico. Se puede ya deducir que el contenido en agua es una característica adversa.

A medida que se incrementa la temperatura, segunda fase, comienza la descomposición pirolítica en torno a los 150°C, generándose fracciones volátiles y carbono fijo, como ya se comentó anteriormente.

En la tercera fase las fracciones volátiles liberadas comienzan a arder, al entrar en contacto con el aire, si el aporte de calor del entorno permite que alcance temperaturas superiores a los 225°C. Un esquema de la combustión puede verse en la figura 1.2.

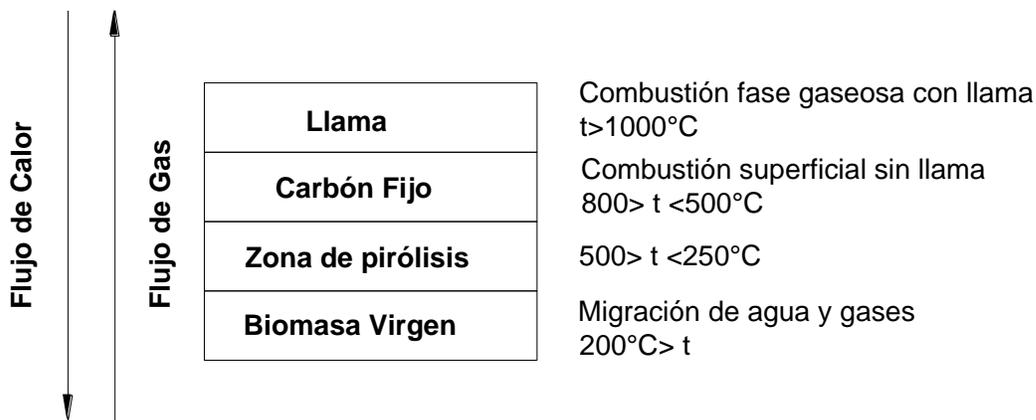


Fig. 1.1. Combustión de una partícula sólida de biomasa (Granada, 1999).

La combustión de los volátiles y del carbono fijo demandan distintas cantidades de comburente, así para la combustión de los volátiles es necesario un coeficiente de exceso de aire inferior, mientras que el carbono fijo demanda aire en exceso. Proporciones de aire inferiores al estequiométrico, provocan un aumento del contenido de CO.

Son diversos los parámetros que afectan la combustión de la biomasa, pero un estudio amplio de todos ellos rebasa el objetivo de este trabajo. A los efectos, sólo se tendrán en cuenta aquellos que pueden ser controlados en el proceso de densificación, como es el caso de la humedad, forma y tamaño y densidad.

a)- Influencia de la humedad: El contenido de agua de un combustible sólido viene dado por su porcentaje en peso en base seca. El efecto de la humedad en el poder calorífico de la biomasa queda reflejado en la siguiente ecuación:

$$B = \frac{B_0}{1+H} - H \cdot C_p \cdot \Delta t + L$$

Donde: H –Humedad

Vcs –Poder calorífico

C_p –Calor específico

L –Calor latente de evaporación

Vci –Poder calorífico inferior

Δt –Variación de temperatura

Es evidente que la energía necesaria para la ignición de la biomasa, aumentará con el contenido en humedad de ésta, hasta llegar a un punto en que la combustión es imposible. El límite máximo está establecido en el 67% de humedad. Con esta humedad el poder calorífico puede disminuir en 5000 kJ/kg a partir de los 18500 kJ/kg, que puede contener la biomasa lignocelulósica con un 10% de humedad. Aunque, si bien es cierto que el contenido en humedad disminuye la eficacia del proceso de combustión, en diversos experimentos se ha concluido que la máxima eficiencia de combustión se obtiene con contenidos de humedad alrededor del 5%. Esta aparente contradicción es atribuida a la excesiva velocidad de liberación del calor en el caso de la biomasa lignocelulósica completamente seca.

b)- Influencia de la forma y tamaño: El cociente entre el volumen y la superficie (v/s en mm) del combustible, dependientes de su forma y tamaño, tiene gran influencia en la velocidad de penetración del proceso de carbonización (V en mm/s) en el material aún virgen. Dicha influencia viene cuantificada por la siguiente ecuación:

$$V = \frac{v/s}{Vol \cdot t}$$

Donde: Vol –Contenido en volátiles en base seca; t – tiempo que dura el experimento en s

Esta velocidad es un parámetro fundamental, dependiendo del uso del combustible. Así en aplicaciones donde no existe un control eficaz del comburente suministrado (hogar abierto, barbacoas), el aumento de esta velocidad provoca el aumento del contenido de CO (debido a la rápida generación de volátiles) así como de inquemados. Desde este punto de vista las formas cilíndricas no serían

tan deseables como aquellas con secciones rectangulares. De todas maneras se sigue abogando por las formas cilíndricas por la simplicidad y la economía de su fabricación y la de sus repuestos. Desde el punto de vista del almacenamiento presenta la ventaja de que la superficie exterior es menor, con lo que es más improbable que se humedezcan. Por otra parte el poseer una superficie menor por unidad de masa, disminuye la velocidad absoluta de combustión, pues disminuye la liberación de los volátiles generados en contra de la mayor producción de estos por avance de la carbonización, provocando que el proceso sea más gradual, por lo que en este aspecto las formas cilíndricas resultan más favorecedoras.

c)- Influencia de la densidad y la resistencia a la rotura: Ambas están relacionadas con las fuerzas de cohesión. Los estudios del efecto de la cohesión del combustible sobre la calidad de la combustión, aun estando inconclusos, orientan hacia la necesidad de que el material no se disgregue durante la combustión, pues además de aumentar la liberación de volátiles, dificultan la evacuación de cenizas al tiempo que, mezclado con ellas, terminan en el cenicero. Por otra parte, la descomposición del material dificulta el paso del comburente, con los consiguientes problemas de mezcla con el combustible.

d)-Influencia del contenido de cenizas: Por cenizas de un combustible se entiende las materias minerales que le acompañan. El origen de las mismas se achaca al momento mismo de la formación del combustible por combinación con los materiales adyacentes o con restos de materia orgánica. También puede provenir de virutas metálicas o áridos adquirido en los distintos procesos a los que se ve sometida la biomasa hasta su uso definitivo.

Son perjudiciales pues disminuyen el poder calorífico, reducen la temperatura de combustión y dificultan la transmisión del calor. Funden a temperaturas relativamente bajas formando escorias perjudiciales para los materiales refractarios. Esto es más perjudicial en hogares con parrillas, habituales en combustión de biomasa, pues la degradan al tiempo que la taponan originando una combustión irregular por disminución del tiro.

1.10 Ventajas y desventajas del aprovechamiento de la biomasa.

1.10.1 Ventajas.

La biomasa es una fuente renovable de energía y su uso no contribuye a acelerar el calentamiento global; de hecho, permite reducir los niveles de dióxido de carbono y los residuos de los procesos de conversión, aumentando los contenidos de carbono en la biosfera.

La captura del metano de los desechos agrícolas y los rellenos sanitarios, y la sustitución de derivados del petróleo, ayudan a mitigar el efecto invernadero y la contaminación de los acuíferos.

Los combustibles biomásicos contienen niveles insignificantes de sulfuro y no contribuyen a las emanaciones que provocan “lluvia ácida”.

La combustión de biomasa produce menos ceniza que la de carbón mineral, puede usarse como insumo en los suelos y como aditivo para la obtención de materiales de la construcción.

La conversión de los residuos forestales, agrícolas y urbanos para la generación de energía reduce significativamente los problemas que trae el manejo de estos desechos.

No está sujeta a las fluctuaciones de precios de energía, provocadas por las variaciones en el mercado internacional de importaciones de combustibles.

El uso de los recursos de biomasa puede incentivar las economías rurales, creando más opciones de trabajo y reduciendo las presiones económicas sobre la producción agropecuaria y forestal.

Las plantaciones energéticas pueden reducir la contaminación del agua y la erosión de los suelos, así como favorecer el mantenimiento de la biodiversidad.

1.10.2 Desventajas.

Por su naturaleza, la biomasa tiene una baja densidad relativa de energía, es decir, se requiere disponibilidad de grandes volúmenes para producir potencia, por lo que el manejo y transporte se encarecen y se reduce la producción neta de energía. La clave de este problema es ubicar el proceso de conversión cerca de las fuentes de producción de biomasa.

Su combustión incompleta produce materia orgánica, monóxido de carbono (CO) y otros gases. Si se usa combustión a altas temperaturas, también se producen óxidos de nitrógeno. A escala doméstica el impacto de estas emanaciones sobre la salud familiar es importante.

La producción y procesamiento requiere importantes insumos, como combustibles y fertilizantes, por lo cual el balance energético es reducido en el proceso de conversión.

Aún no existe una plataforma económica y política generalizada para facilitar el desarrollo de tecnologías de biomasa.

El potencial calórico de la biomasa es muy dependiente de las variaciones en el contenido de humedad, clima y densidad de la materia prima.

Como se aprecia la mayoría de las desventajas se derivan de su baja densidad física y energética. La densidad energética en peso MED y la densidad energética en volumen VED de las biomásas son de tres a cuatro veces inferior a la de la gasolina o el carbón.

1.11 Estado del arte.

1.11.1 Problemas asociados con la utilización de la biomasa como combustible.

A pesar de la gran generación de residuos agrícolas y forestales, el nivel actual de su utilización como combustible es bajo, dependiendo de la economía y disponibilidad del equipamiento tecnológico.

El uso del recurso biomásico en plantas de energía locales pequeñas tiene la desventaja del alto costo de inversión específica, una necesidad alta de trabajadores y una baja eficiencia térmica comparada con una planta de energía más grande. Los parámetros que influyen en su uso son: contenido de humedad, cenizas, materia volátil y emisiones de contaminantes entre otros. Otra razón para el bajo nivel actual de utilización de biomasa como combustible es la falta de información suficiente del suministro de combustible (forma y tamaño), así como las características de combustión y emisión de estos residuos. Esta información es importante para el diseño y la operación eficiente de los sistemas de combustión, por lo cual se centrará la atención del trabajo en esta dirección.

Aparte de algunas consideraciones de diseño de los hornos, las soluciones sugeridas o aplicadas de los problemas resultantes de los puntos de fusión bajos de la ceniza de los residuos son:

Uso de aditivos.

Uso de materiales alternativos en el caso de lechos Fluidizados.

Mezcla de biomasa con otros combustibles, como carbón, lignito.

Briquetas tubulares y multitubulares.

1.11.2 Modelos de combustión de sólidos.

Levenspiel, reporta que en la actualidad para analizar la cinética de los procesos en los cuales intervienen reacciones termo-químicas se utilizan varios modelos cinéticos los cuales son (Fundora, 2009):

Modelo de núcleo sin reaccionar (SCM).

Modelo de conversión uniforme (UCM).

Modelo granular (GPM).

Modelo de núcleo fraccionado (CCM).

Modelo de poros no uniformes (CVM).

Modelo de descomposición térmica (TDM).

Modelo de cambio de fase (PCM).

Modelo Avrami.

Modelo de núcleo sin reaccionar para reacciones de múltiples pasos.

Modelo granular para reacciones múltiples de partículas porosas.

Modelo de poros no uniforme para reacciones múltiples de partículas que se convierten en más porosas en el interior del reactor.

1.12 Proceso de combustión de los combustibles sólidos.

Combustión: Es la combustión rápida del oxígeno del aire, con los distintos elementos que constituye el combustible, y por consiguiente desprende una cierta cantidad de calor.

Los aspectos que deben tenerse en cuenta para garantizar una buena combustión son los siguientes:

Preparación del combustible en cuanto a su estado físico y su temperatura.

Selección adecuada del tipo de quemador.

Proporción entre la cantidad de aire y la cantidad de combustible para que exista oxígeno suficiente sin que exista defecto o exceso de aire.

Características propias del horno de manera que aseguren el buen mezclado del aire con el combustible.

Combustibles: Los combustibles son sustancias que al combinarse con el oxígeno arden con desprendimiento de calor, en la práctica este término se limita a aquellas que tienen la propiedad antes señalada pero que se utilizan con fines técnicos o industriales.

Para que una sustancia desde el punto de vista energético se considere como combustible, debe cumplir los siguientes requisitos:

Tener elevado poder calórico.

No ser materia prima de ninguna industria.

Que exista en cantidades abundantes.

Que no sea tóxico, ni contaminante.

Que sea fácil de manipular y transportar.

A nivel mundial se utilizan los combustibles orgánicos y combustibles nucleares.

Dentro de los combustibles orgánicos los más utilizados son:

Sólidos: Naturales (madera y residuos vegetales, turba, lignitos, hullas, carbón de piedra, antracita).

Artificiales: Carbón vegetal, coque, carbón pulverizado.

Líquidos: Naturales (petróleo).

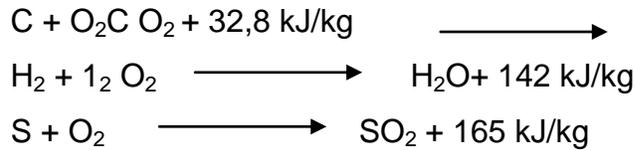
Artificiales: Gasolina, queroseno, gas oíl, fuel oíl.

Gaseosos: Naturales (gas natural).

Artificiales: Gas pobre, gas de agua, gas de horno, gases licuados (propano, butano).

El aire que es utilizado para la combustión está compuesto por un 21 % de oxígeno y un 79 % de nitrógeno.

Combustión Completa: Es cuando todos los productos resultantes de la reacción logran el grado máximo de oxidación. En este tipo de combustión las principales reacciones químicas que tienen lugar son:



Combustión Incompleta: Es cuando todos los productos resultantes de la reacción no logran el grado máximo de oxidación. De esta forma se obtienen compuestos parcialmente oxidados como: monóxido de carbono y restos de combustibles sin oxidar como: hidrógeno, partículas de carbón, etc.; este proceso puede ser con exceso o defecto de aire.

Combustión Exotérmica: Es una combustión completa, ya que esta se lleva a cabo en el aire teórico necesario, o sea, se realiza sin exceso, ni defecto de aire, y se obtienen productos totalmente oxidados (CO₂, SO₂, etc.)

La relación entre el aire utilizado en la combustión y el aire teórico correspondiente al combustible denominado; coeficiente de exceso de aire (α).

$$\alpha = \frac{\text{Aire Total}}{\text{Aire Teórico}} \quad (\text{ec.1.1})$$

Las etapas de la combustión de los combustibles sólidos son:

- Calentamiento.
- Revaporización de humedad (secado).
- Liberación de sustancias volátiles y su combustión.
- Combustión del coque.

1.13 Gasificación.

Gasificación es un término que describe el proceso químico mediante el cual materiales carbónicos (hidrocarburos) como el carbón, el coque de petróleo o la biomasa, son convertidos en un gas por medio de su oxidación parcial con aire, oxígeno o vapor (Belo, 2014).

Sistemas modernos de gasificación, generalmente operan con la siguiente técnica:

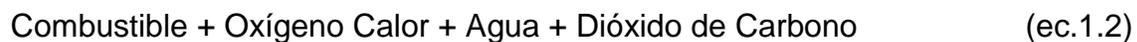
La materia prima (hidrocarburo) es introducida al reactor químico (gasificador), el cual se encuentra a alta presión y alta temperatura, conteniendo vapor y una limitada cantidad de oxígeno.

Bajo estas condiciones de reducción, los enlaces químicos del hidrocarburo son rotos debido a la alta presión y temperatura, dando lugar a la formación de biogás o gas de síntesis. Este gas, es principalmente, una mezcla de hidrogeno y monóxido de carbono.

Luego, el gas generado, es filtrado para remover partículas dañinas como el azufre y algunas trazas metálicas como el mercurio.

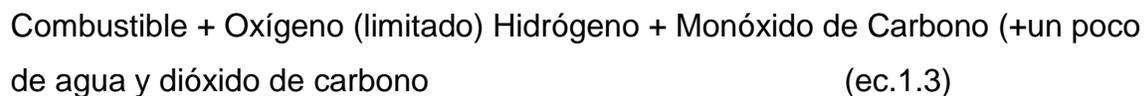
1.13.1 Diferencia entre gasificación y combustión.

Combustión (o quema) es una reacción exotérmica (liberación de calor) entre un combustible y un oxidante y de manera general, puede expresarse como:



En una combustión completa, los productos que se obtienen a partir del carbono y el hidrógeno presente en el aire, son dióxido de carbono y agua, respectivamente. El oxígeno presente en el combustible, se incorpora a los productos de la combustión lo cual disminuye la cantidad de aire de combustión necesario.

La gasificación es una reacción exotérmica entre un combustible de carbón y un oxidante, en un reactor donde el suministro de oxígeno es limitado (generalmente del 20 al 70% de oxígeno necesario para la combustión completa). La reacción puede expresarse (Belo, 2014):



1.13.2 Gasificador.

El gasificador es el “corazón” del proceso de gasificación. El gasificador es el medio físico mediante el cual se proporcionan las condiciones adecuadas para llevar a cabo la gasificación del combustible y en la actualidad son cuidadosamente elaborados para procesarlo de varias maneras de acuerdo al tipo de combustible, la finalidad del biogás, el tamaño del proceso y la fuente de

oxígeno. El oxígeno puede ser introducido como un gas puro o puede venir como una mezcla de aire o vapor (González, 2011).

1.13.3 Proceso de gasificación.

El proceso de gasificación produce un biogás a partir de materiales orgánicos como biomasa, calentándolos bajo condiciones cuidadosamente controladas como la temperatura, presión y las condiciones atmosféricas. La clave para la gasificación es usar menos oxígeno del necesario para una combustión completa. El combustible resultante de la gasificación es llamado biogás o gas combustible, el cual (como un gas natural) puede quemarse en turbinas de gas de alta eficiencia. La gasificación es un proceso limpio con poca o ninguna emisión de ceniza. Es muy económico y su desempeño no depende del tamaño del gasificador.

1.13.4 Termoquímica del proceso de gasificación.

En el proceso de gasificación de biomasa tienen lugar varias reacciones cuyo orden e importancia depende de las condiciones de operación, del combustible y de los elementos del agente gasificante utilizado, pero que pueden agruparse en tres etapas principales:

1) Pirolisis o descomposición térmica: Es la etapa en la que, mediante calor y en ausencia de oxígeno suficiente, el combustible se descompone en una mezcla de sólido, líquido y gas. Al sólido originado en esta etapa se le conoce como “char” y a los líquidos, debido a la presencia de alquitranes y vapores condensables, se les llama “tar”. Puede incluirse aquí el proceso de secado y precalentamiento que tiene lugar al entrar la biomasa al gasificador, aunque este proceso no implica ninguna reacción química.

2) Oxidación o combustión: Tiene lugar cuando el agente gasificante es un oxidante como oxígeno o aire, e implica el conjunto de reacciones de oxidación, tanto homogéneas como heterogéneas, fundamentalmente exotérmicas, mediante las que se genera el calor necesario para que el proceso se mantenga.

3) Reducción o gasificación: La constituyen las reacciones sólido-gas o en fase gas, mediante las que el sólido remanente se convierte en gas. Se trata de

reacciones fundamentalmente endotérmicas, algunas de las cuales tienen lugar en muy poca extensión, o solo tienen lugar en determinadas condiciones, como ocurre con algunas reacciones de hidrogenación y/o reformado.

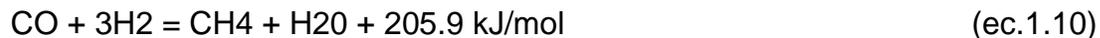
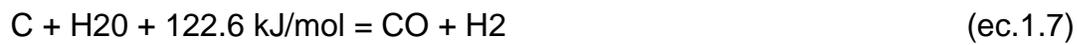
Las etapas de oxidación y reducción pueden considerarse conjuntamente en una sola etapa de gasificación en la que tienen lugar todo tipo de reacciones posibles entre el char y la mezcla gaseosa presente.

La combustión que ocurre en la zona de oxidación, es descrita por las siguientes fórmulas:



Así, al quemar 1 mol de carbono y convertirlo en dióxido de carbono se liberan 401.9 kJ aproximadamente.

La cadena de reacciones más importantes, que toman lugar en la zona de reducción del gasificador entre diferentes reactantes sólidos y gaseosos son:



Las reacciones principales de la etapa de reducción (ecuaciones 1.6 y 1.7), son endotérmicas. Es decir necesitan absorber energía por lo que la temperatura de reacción disminuirá durante la reducción.

La (ecuación 1.8) describe el equilibrio agua-gas. Para cada temperatura, en teoría la proporción entre el producto de la concentración de monóxido de carbono-vapor de agua y el producto de la concentración de dióxido de carbono-hidrógeno es fijado por el valor constante de equilibrio del agua-gas (KW) el cual se obtiene de la siguiente manera:

$$KW = \frac{[CO] \cdot [H_2O]}{[CO_2] \cdot [H_2]} \quad (\text{ec.1.11})$$

En la práctica, la composición de equilibrio del gas solamente será alcanzada en los casos en que la tasa de reacción y el tiempo para la reacción sean suficientes.

La tasa de reacción disminuye con la temperatura. Debajo de los 700 °C la

reacción agua-gas se vuelve muy lenta sin un catalizador. Entonces la composición del gas permanece constante, y el metano solamente será generado a temperaturas muy elevadas, mayores de 1200°C. El concepto del equilibrio agua-gas brinda la oportunidad de calcular teóricamente la composición del gasificador, que ha alcanzado el equilibrio a una temperatura dada (González, 2011).

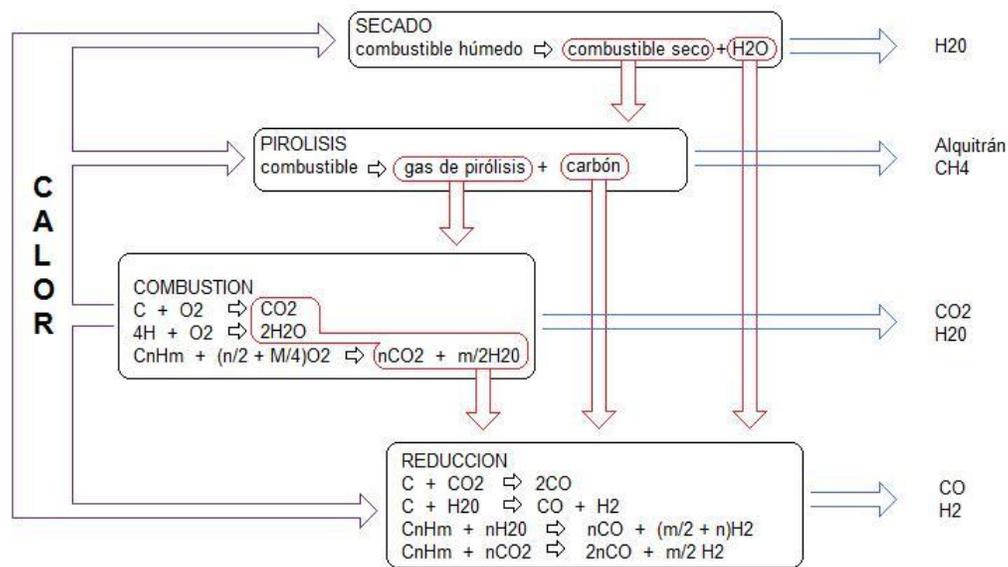


Figura 1.2 Etapas de la gasificación.

1.13.5 Tipos de gasificadores.

Los gasificadores se pueden agrupar, según el manejo del combustible, en 3 grupos fundamentales:

De cama fija: En donde el combustible permanece estático dentro del gasificador, y el frente de pirólisis va consumiendo la totalidad de la carga ingresada. Estos gasificadores se subdividen, según el sentido del flujo del agente gasificante en: gasificador de cama fija en contra corriente, gasificador de cama fija en corriente paralela y gasificador de tiro cruzado.

De cama fluidizada: En donde el combustible viaja dentro del gasificador junto con el agente de oxidación, el cual reacciona con las partículas de biomasa mientras se De flujo arrastrado: En donde el combustible es pulverizado para lograr una

densa nube de combustible, forzando al agente gasificante a fluir a través de él reaccionando al pasar.

De flujo arrastrado: En donde el combustible es pulverizado para lograr una densa nube de combustible, forzando al agente gasificante a fluir a través de él reaccionando al pasar. (González, 2011).

	1) De cama fija	2) De cama fluidizada	3) Flujo arrastrado
	corriente paralela	contra corriente	densa
	700-1200	700-900	<900
Breas	baja	muy alta	intermedia
Control	fácil	muy fácil	intermedio
Potencia	<5MW	<20MW	10<MW<100
Combustible	muy crítico	crítico	poco crítico

Figura 1.3 Cuadro comparativo entre los distintos tipos de gasificadores.

1.14 Tipos de horno.

La selección del tipo de horno, está en función del tamaño del combustible y la potencia que se desee obtener.

1.14.1 Selección del tipo de horno para el bagazo de caña.

Debido a que el bagazo de caña es un material compuesto básicamente por fibras largas de aproximadamente 20cm de longitud, debo de seleccionar un horno que trate con este tipo de material. Para este caso tengo dos tipos de opciones a elegir que podría estar en función del costo de cada horno (Toscano, 2009).

Entonces:

Tipo de sistema de combustión:

Combustión en lecho fijo.

Tipo de horno a utilizar:

Horno de parrilla.

Tipo de parrilla.

Parrilla móvil inclinada.

Parrilla móvil horizontal.

Opción 1

Horno de parrilla móvil inclinada.

El horno de parrilla móvil, tiene generalmente una parrilla inclinada que consiste en filas fijas y móviles de barras de la parrilla (véase figura 1.4) alternando los movimientos delanteros y posteriores horizontales de las secciones móviles, el combustible se transporta a lo largo de la parrilla. Así las partículas inquemadas y quemadas del combustible son mezcladas, las superficies del lecho del combustible se renueva y una distribución más uniforme del combustible sobre la superficie de la parrilla puede ser alcanzada (que es importante para una distribución del aire primario igual a través del lecho del combustible).

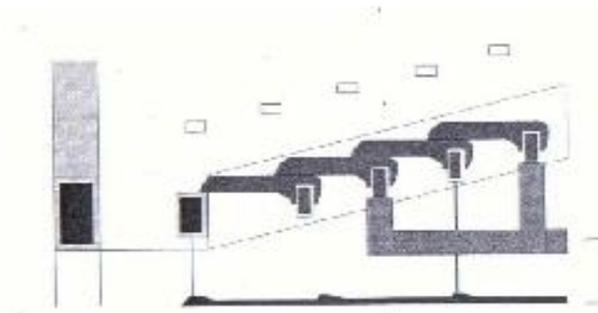


Figura 1.4 Parrilla Móvil inclinada.

Generalmente, toda la parrilla se divide en varias secciones, que se pueden mover a varias velocidades según las diversas etapas de la combustión (véase figura 1.5). El movimiento de las barras de la parrilla se logra por los cilindros hidráulicos. Las barras de la parrilla están hechas de aleaciones de acero a prueba de calor. Las barras de la parrilla están equipadas de pequeños canales en sus paredes laterales para el suministro de aire primario y debe ser tan estrecho como sea

posible para distribuir el aire primario a través de lecho del combustible también como sea posible. En el horno de parrilla móvil, una gran variedad de combustible de biomasa puede ser quemada. Los hornos móviles refrescados por aire de la parrilla, utilizan el aire primario para refrescar la parrilla y son convenientes para la corteza, el aserrín y las astillas mojadas. Para el combustible de biomasa o los combustibles secos de biomasa con temperaturas bajas de sinterización de la ceniza, se recomiendan los sistemas móviles refrigerados por agua de la parrilla. En contraste con los sistemas de parrilla que viajan, el ajuste correcto de la frecuencia móvil de las barras de la parrilla es más complejo. Si las frecuencias móviles son demasiado altas, las altas concentraciones de carbón inquemados habrá en la ceniza o insuficiente cobertura de la parrilla resultara. Las vigas infrarrojas situadas sobre varias secciones de la parrilla permiten el control adecuado de las frecuencias móviles comprobando la altura de lecho.

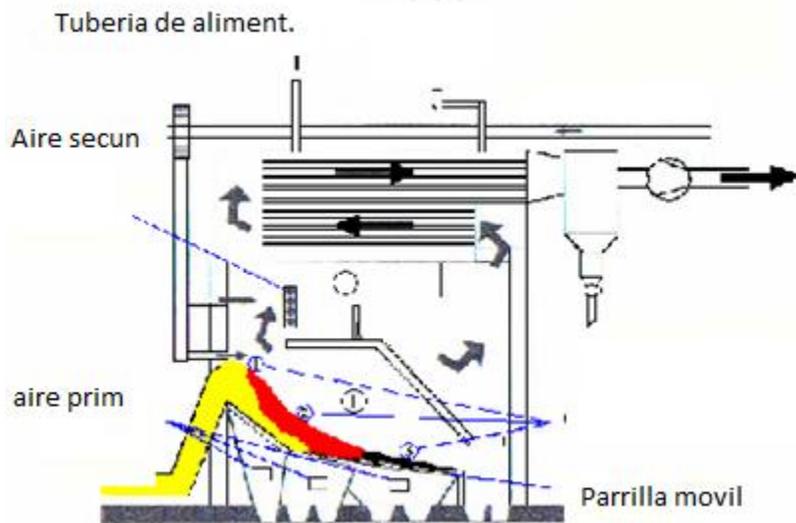


Figura 1.5 Horno moderno de parrilla móvil inclinada con sistema de control infrarrojo.

El retiro de la ceniza ocurre por debajo de la parrilla en forma seca o mojada. La operación es completamente automática y todo el sistema entero es común.

Opción 2

Horno de parrilla móvil horizontal.

La parrilla móvil horizontal, tiene un lecho de combustible totalmente horizontal. Esto se logra por la posición diagonal de las barras de la parrilla (véase figura 1.6). Las ventajas de esta tecnología son el hecho de que los movimientos incontrolados del combustible sobre la parrilla por la gravedad se impiden y que el efecto de atizado por el movimiento de la parrilla se incrementa, así llevando a una distribución más homogénea del material en la superficie de la parrilla e impidiendo la formación de la escoria como resultado de puntos calientes. Otra ventaja de la parrilla móvil horizontal es que la altura total puede ser reducida. Para evitar las partículas de ceniza y del combustible que caen a través de las barras de la parrilla, la parrilla móvil horizontal debe ser precargada de modo que no haya espacio libre entre las barras.

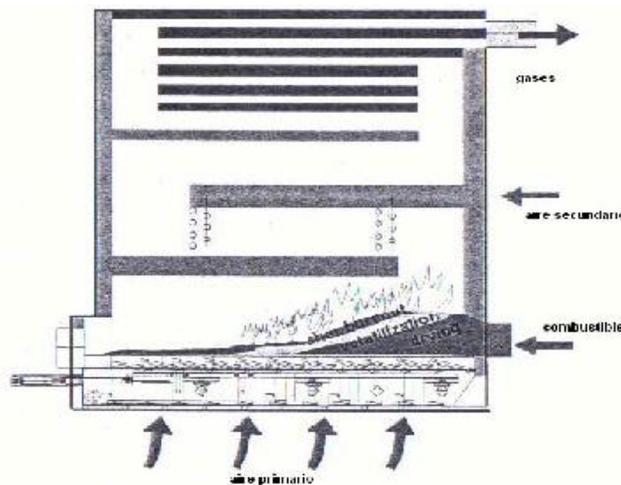


Figura 1.6 Diagrama de un horno de parrilla móvil horizontal.

1.14.2. Selección del tipo de horno para la cascarilla de arroz

Al tratar con un combustible sólido de aproximadamente 8 a 9 mm de longitud y 1mm de diámetro, debo de tener mucho cuidado en seleccionar el tipo de horno. Para seleccionar el tipo horno tengo que considerar los siguientes parámetros;

- 1) Tamaño del combustible.
- 2) Capacidad de potencia que se desea generar.

El tamaño del combustible lo tengo, pero el de la potencia asumo un valor mayor a 20MW.

Entonces:

Tipo de sistema de combustión:

Combustión en lecho fluidizado.

Tipo de horno a utilizar:

Lecho fluidizado burbujeante

Opción 1

Lecho fluidizado burbujeante (LFB)

Para las plantas con capacidad nominal de la caldera mayor de 20MW, los hornos de LFB comienzan a ser de interés. En el horno de LFB (véase figura 1.7), el material de lecho está situado en la parte inferior del horno. El aire primario se suministra sobre una placa del distribuidor del inyector debajo y fluidifica el lecho. El material de lecho es generalmente arena de sílice de cerca de 0.5-0.1mm en diámetro, la velocidad de la fluidificación del aire varía entre 1 y 2m/s. El aire secundario se introduce a través de varias entradas bajo la forma de grupos de inyectores horizontalmente dispuestos al principio de la parte superior del horno para asegurar un suministro de aire y reducir las emisiones NOx. Contrario al horno con carbón de LFB, el combustible de la biomasa no se debe alimentar sobre, pero en el lecho por los canales inclinados de tolvas del combustible debido a la reactividad más alta de la biomasa con respecto al carbón. El combustible asciende solamente al 1-2 por ciento de la sílice y la sílice tiene que ser calentada (interno o externamente) antes de que se introduzca el combustible. La ventaja del horno de LFB es su flexibilidad referente al tamaño de la partícula y al contenido de agua del combustible de biomasa. Además, es también posible utilizar la mezcla de diversas clases de biomasa o co-uego ellas con otros combustibles. En el horno moderno de LFB una sub-estequiométrica operación de lecho (cerca de 0.35) es posible, que permite que la temperatura de lecho sea controlada en un rango de 650-850°C. Por lo tanto, los combustibles con temperatura de ceniza-fusión baja pueden también ser quemados. Los problemas de la corrosión pueden ser reducidos al mínimo usando sobrecalentadores refractario alineados, en el primer y segundo paso. En hornos modernos de LFB la operación de carga parcial está en el rango de 60-100 por ciento de la carga nominal que sea posible.

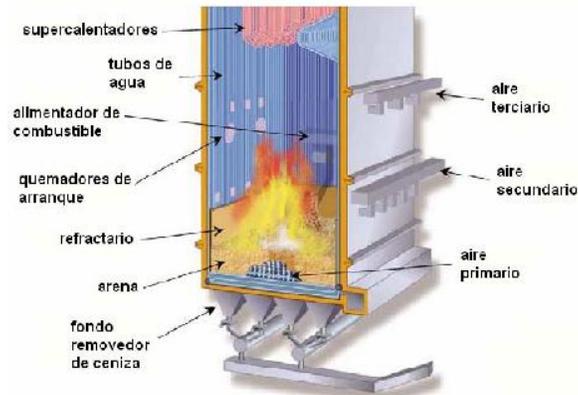


Figura 1.7 Horno fluidizado burbujeante (LFB)

1.14.3 Selección del tipo del horno para la cascarilla de café.

Para este tipo de combustible sólido de aproximadamente 8 a 9 2 mm de área y espesor de 0.15 mm, debo de tener mucho cuidado en seleccionar el tipo de horno. Para seleccionar el tipo horno, debo de considerar los siguientes parámetros:

- 1) Tamaño del combustible.
- 2) Capacidad de potencia que se desea generar.

El tamaño del combustible lo tengo, pero el de la potencia asumo un valor mayor a 30MW.

Entonces:

Tipo de sistema de combustión:

Combustión en lecho fluidizado.

Tipo de horno a utilizar:

Lecho fluidizado de recirculación.

Opción 1

Lecho fluidizado de recirculación (LFR)

Aumentando la velocidad de fluidificación a 5-10m/s y usando partículas más pequeñas de la arena (0.2-0.4mm en diámetro) un sistema de LFR se obtiene. Las partículas de arena serán llevadas con el humo, separadas en un ciclón caliente o en un separador de U-viga y reingresando a la cámara de combustión (véase figura 1.8). La temperatura del lecho (700-900°C) es controlado por los intercambiadores de calor externos que refrescan la arena reciclada, o por las

paredes refrigeradas por agua. La turbulencia más alta en hornos de LFR lleva a un mejor traspaso térmico y a una distribución muy homogénea de la temperatura en el lecho. Esto le a la ventaja de obtener condiciones estables de la combustión; el control del aire por etapas y la colocación de superficies de calefacción apropiadas en la parte superior del horno. Las desventajas del horno de LFR es su gran tamaño y por lo tanto un precio más alto; la carga del polvo aún mayor en el humo que deja el separador de partícula de arena en comparación con los sistemas de LFB; y el pequeño tamaño de la partícula del combustible requerido (diámetro de 0.1 - 40mm), que causa a menudo una inversión más alta en el tratamiento previo del combustible.

Debido a su alta capacidad específica del traspaso térmico, el horno de LFR debe de ser de interés para las plantas mayores de 30MW debido a su eficacia de combustión más alta y el flujo más bajo del humo producido (la caldera y las unidades de limpieza del humo se pueden diseñar para ser más pequeñas)

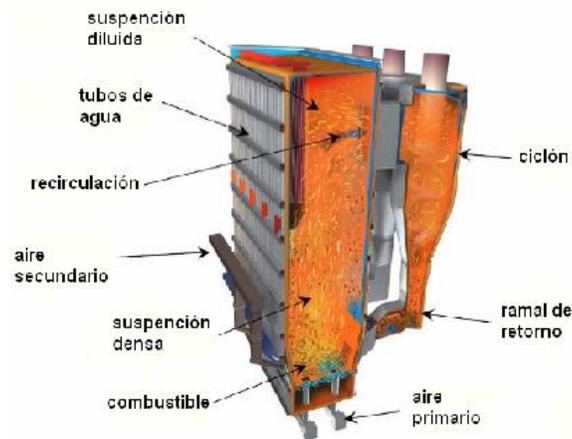


Figura1.8 Horno de LFR.

Conclusiones parciales:

- 1 - La posibilidad del uso de las biomásas en sus estados naturales, con alto o bajo grado de granulometría, no se toman en cuenta como alternativas de combustibles en los diseños de hornos.
- 2 - Todas las variantes de hornos y estufas analizados en la literatura utilizan el principio de dos combustiones, combustión primaria y combustión secundaria.
- 3 - Se mostraron las distintas variantes de horno de combustión de sólidos en lecho fijo y lecho móvil de capa gruesa del colchón de combustible y los hornos de combustión en lecho fluidizado, en ninguno de los casos se aborda la influencia de la tubularidad en el proceso de combustión.

Capítulo 2

Estudio del proceso de combustión gasificación utilizando el principio de la multitubularidad natural o provocada.

2.1 La Multitubularidad y la efectividad de la combustión de los combustibles.

Los combustibles sólidos al igual que los líquidos, se agrupan por sus cualidades y ello responde en primer lugar, a la facilidad de los mismos de gasificarse y en segundo lugar, a su capacidad de dar respuesta a los requisitos de la combustión, según la aplicación específica. Cuando un combustible líquido se considera pesado, se refiere a un combustible con dificultades en gasificar, con un bajo índice de inflamación (Elevado tiempo de ignición), lo que hace necesario el precalentamiento para su garantía, además de requisitos adicionales, vinculados a una compleja y costosa tecnología para el aseguramiento aceptable de la combustión. Los combustibles sólidos y en particular los que provienen de las biomásas residuales no leñosas no son ajenos a las dificultades precedentes, sobre todo cuando se queman en pila de capa gruesa o en forma de briquetas macizas de medianas y grandes dimensiones y altas densidades, en hornos térmicamente ineficientes, donde las temperaturas del ambiente de combustión resultan inferiores a 700⁰C.

Todos los factores vinculados a un combustible sólido que aseguren la inflamación del mismo en el mínimo tiempo posible, con independencia de las condiciones de combustión, con elevada potencia y energía térmica, contribuyen a caracterizarlo desde el punto de vista de su calidad como tal, será de peor calidad, el que no satisfaga estos requisitos. Cuando se utiliza en una aplicación combustible de baja calidad, desde el punto de vista de la combustión, ello presupone gastos adicionales en la preparación del mismo y en la tecnología de combustión, para asegurar una combustión con aceptables índices. Los experimentos con biomásas residuales leñosas y no leñosas densificadas en forma de briquetas tubulares y multitubulares, en la combustión en pila de capa gruesa. (Infante, 2010), demostraron que la macro multitubularidad es la garantía de la gasificación de dichos combustibles sólidos, con independencia de las dimensiones geométricas y de la densidad. Para la valoración cualitativa de un combustible sólido, se consideró tomar en cuenta la magnitud de los siguientes factores de respuesta, en las diferentes fases de la combustión, tal es: El tiempo de ignición o de inicio de la inflamación del combustible (tig), índice de combustión promedio (ICP) o velocidad

media de la reacción de combustión, velocidad específica de la reacción de combustión (k) o reactividad específica. Las condiciones para la determinación de los factores precedentes; briquetas individuales, en combustión fuera de una cámara de combustión y con registro de la pérdida de masa en la unidad de tiempo. Los factores, potencia térmica aportada por el combustible (Nb) y la eficiencia del sistema de combustión (η_{SC}), fueron determinados en un horno de combustión en pila con una masa determinada de briquetas y por consiguiente en un número, en correspondencia con la masa y la densidad exigida en el experimento, que colocadas convenientemente en la cámara de combustión de la instalación, hacen el equivalente a una gran biqueta multitubular, independientemente de las características individuales de las briquetas investigadas.

2.2 Diseño de experimento para determinar la influencia de la tubularidad y multitubularidad de las briquetas de diferentes biomasa, en los índices fundamentales de combustión que posibilitan caracterizar la cálida térmica de las mismas.

Se utilizó un diseño factorial completo 2^4 con briquetas de dimensiones exteriores (Diámetro exterior, $D=100\text{mm}$ y longitud, $L=100\text{mm}$) y con los siguientes factores independientes: Relación equivalente del diámetro del conducto al diámetro exterior de la biqueta $\lambda_{eq} = \frac{d}{D}$, número de conductos (z), Tipo de biomasa (ρ_0), densidad de la biqueta (ρ), el diámetro del conducto equivalente se determina por relación ($d_{eq}=z^{1/2}*d$), donde (d) representa el diámetro de un conducto de la biqueta tubular o multitubular.

El factor que designa específicamente la tubularidad equivalente de las briquetas (Relación del espesor de la biqueta al diámetro equivalente de sus conductos -), no se analiza directamente, su influencia indirecta se determina por el factor independiente (λ_{eq}), ($\beta= (1- \lambda_{eq})/2. \lambda_{eq}$). Lo que demuestra como disminuye con el incremento de (λ_{eq}). En la tabla 2.1 y 2.2 se los niveles experimentales y la matriz.

Tabla 2.1 Factores independientes y sus niveles experimentales.

Nivel	Z	λ_{eq}	ρ_0 (kg/m ³)	ρ (kg/m ³)
-1	1	0,3	25	500
1	5	0,5	120	1000
Z	d (mm)	λ_{eq}	β	
1	30	0,3	1,16	
1	50	0,5	0,5	
5	15	0,3	1,16	
5	25	0,5	0,5	

Tabla 2.2 Matriz de diseño de experimentos factoriales completos 2⁴.

N ₀	λ_{eq}	Z	ρ_0 (kg/m ³)	ρ (kg/m ³)	K min ⁻¹	ICP g/min	Nb kW/kg	Tig. min	η_{sc} %
1	-1	-1	-1	-1	0,021	4,35	1,94	15	44,0
2	1	-1	-1	-1	0,036	7,96	2,74	3	45,0
3	-1	1	-1	-1	0,041	12,70	2,57	5	41,5
4	1	1	-1	-1	0,045	13,75	3,09	2	49,7
5	-1	-1	1	-1	0,041	7,62	1,86	10	46,5
6	1	-1	1	-1	0,048	7,49	2,57	3	43,0
7	-1	1	1	-1	0,062	10,48	2,27	4	40,5
8	1	1	1	-1	0,054	11,50	2,77	2	48,9
9	-1	-1	-1	1	0,023	4,32	1,90	20	45,0
10	1	-1	-1	1	0,038	11,35	2,86	3	43,0
11	-1	1	-1	1	0,044	13,62	2,61	4	42,3
12	1	1	-1	1	0,048	14,73	3,15	2	51,6
13	-1	-1	1	1	0,044	8,76	1,88	12	45,0
14	1	-1	1	1	0,053	10,20	2,61	3	42,3
15	-1	1	1	1	0,070	10,48	2,31	5	40,0
16	1	1	1	1	0,065	13,06	2,79	2	49,5

2.2.1 Resultados del procesamiento estadístico de los diferentes factores independientes con los factores de respuestas.

$$ICP = 10.15 + 1.11 \cdot \lambda_{eq} + 2.39 \cdot Z - 0.19 \cdot \rho_0 + 0.66 \cdot \rho$$

$$R^2=73\%; E=1,78$$

$$K = 0.046 + 0.0024 \cdot \lambda_{eq} + 0.0078 \cdot Z + 0.0088 \cdot \rho_0 + 0.0024 \cdot \rho$$

$$R^2=82; E=0,006$$

$$t_{ig} = 5.94 - 3.44 \cdot \lambda_{eq} - 2.69 \cdot Z - 0.81 \cdot \rho_0 + 0.44 \cdot \rho$$

$$R^2=70; E=3,21$$

$$Nb = 2.49 + 0.33 \cdot \lambda_{eq} + 0.21 \cdot Z - 0.12 \cdot \rho_0 + 0.018 \cdot \rho$$

$$R^2=94,6\%, E=0,11$$

$$\eta_{SC} = 44.8 + 1.82 \cdot \lambda_{eq} + 0.72 \cdot Z - 0.46 \cdot \rho_0 + 0.037 \cdot \rho$$

$$R^2=72; E=3,20$$

2.2.2 - Análisis de los resultados.

En las correlaciones obtenidas se puede observar que la influencia de la densidad de las briquetas no es significativa, lo que resulta de gran ventaja, por cuanto las exigencias en la densificación no constituyen limitante para que las briquetas funcionen bien en la combustión, incluso en condiciones naturales de las biomásas (Sin densificar), siempre que se asegure la macro multitubularidad en la pila dentro del horno. (Infante, 2010). El tipo de biomasa (Leñosa o no leñosa), influye de forma significativa, en la velocidad específica de la reacción de combustión (k) y en la potencia media aportada por el combustible (Nb), en el primer índice, las biomásas leñosas presentan mayor velocidad de reacción que las no leñosas y lo contrario ocurre en el segundo. En todas las correlaciones, excepto la correspondiente a la reactividad específica (k) aparece la relación (λ_{eq}) como el factor independiente de mayor significación y coincide en todos los casos, que las magnitudes más favorables de los diferentes factores de respuestas están asociadas con el incremento de dicha relación (λ_{eq}). El incremento del número de conductos (z) de las briquetas, influye de forma significativa en todos los índices que utilizan las briquetas de forma individual, tal es el caso de la reactividad

específica (k), el tiempo de ignición o de inicio de la inflamación de las briquetas (t_{ig}) y el índice de combustión promedio o velocidad media de la reacción de combustión (ICP) y su influencia es de poca significación, para los índices que dependen de la combustión en pila de múltiples briquetas en un horno (Potencia disipada por el combustible en la combustión (N_b) y eficiencia del sistema de combustión analizado (η_{sc})), dado que independientemente que las briquetas sean tubulares o multitubulares individualmente, en las condiciones de la cámara de combustión de un horno, hacen el equivalente a una gran biqueta multitubular, y las dimensiones de los conductos (d) y su número (z) se conjugan con los conductos producidos en la colocación de las mismas en la pila, para asegurar la multitubularidad requerida ($\beta < 2$).

En la figura 2.1 Se muestra el comportamiento del índice de combustión promedio (ICP) en briquetas tubulares y multitubulares de aserrín de madera y paja de caña, con relaciones (λ_{eq}) próximas a las del diseño precedente (Fundora, 2009).

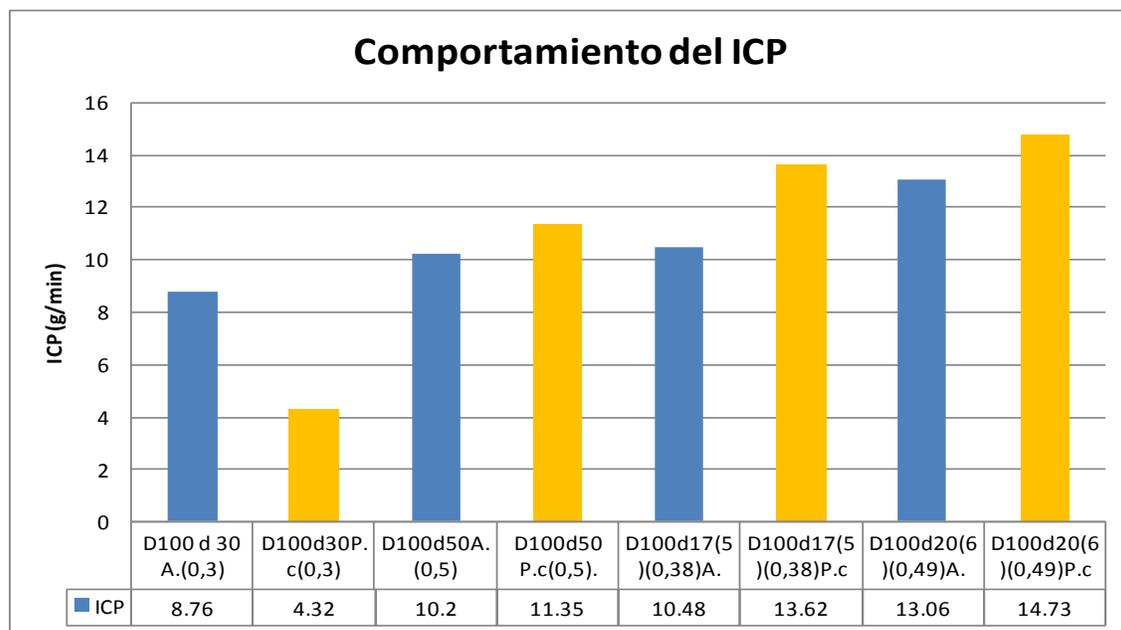


Fig. 2.1 Comportamiento del índice de combustión promedio (ICP) en los distintos tipos de briquetas analizadas. A: Aserrín de madera, Pc: Paja de caña.

En la figura 2.2 Se muestra el comportamiento gráfico del índice de combustión promedio (ICP) y la potencia disipada por la combustión de una masa determinada de briquetas en un horno, puede apreciarse la correspondencia entre ambos factores.

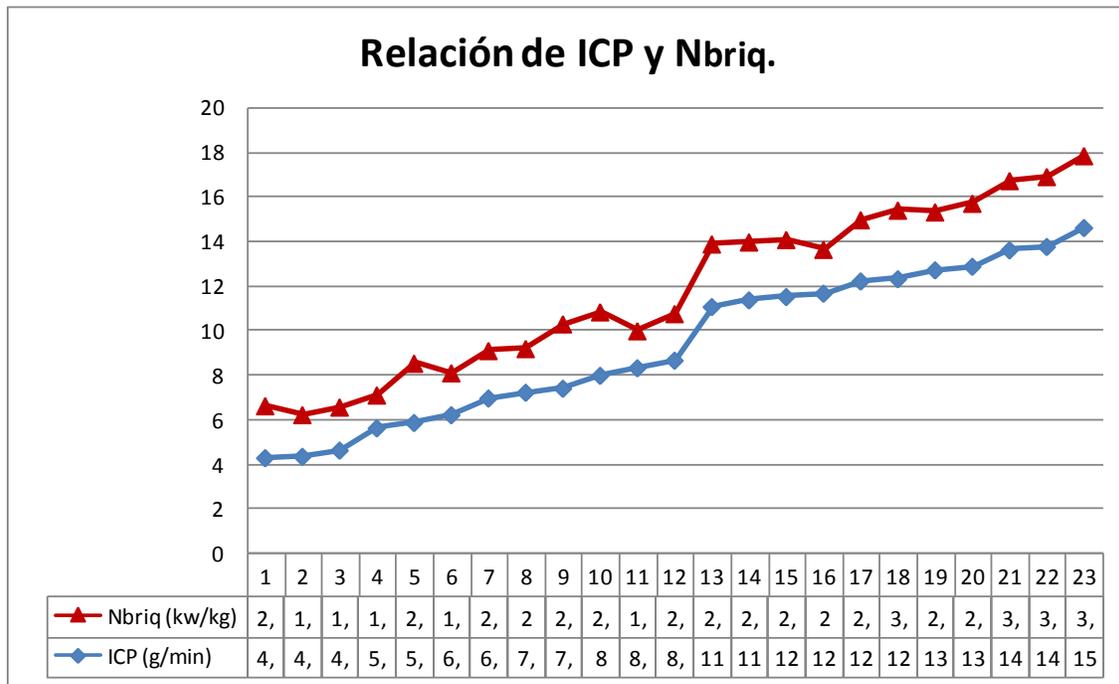


Fig. 2.2 Relación del comportamiento del ICP y N_{briq} en diferentes briquetas tubulares o multitubulares elegidas al azar, buscando desde los valores inferiores de ICP a los superiores y su correspondiente comportamiento en la potencia disipada Nb.

2.3 Índice de transformación de las biomásas o grado de transformación de las biomásas en biogás, durante el proceso de gasificación.

2.3.1 Gasificación de las biomásas en la combustión, multitubularidad provocada.

En el epígrafe 2.3 se demostró experimentalmente que la esencia del proceso de gasificación quedaba determinada por la multitubularidad de la masa del combustible en el interior de una cámara de combustión, y como factor determinante en el comportamiento de los índices fundamentales resultó la relación equivalente de diámetros (λ_{eq}), este factor representa la multitubularidad, por cuanto en el volumen de combustible sólido, existirá un conveniente número

de conductos de dimensiones medibles o no, que satisfagan la magnitud del factor (λ_{eq}), nunca inferior al 30% y ello asegura que la distancia relativa entre los mismos ($\beta < 2$), posibiliten un proceso de gasificación espontáneo y semejante al que ocurre en la naturaleza, para este propósito, se debe provocar la macro multitubularidad, ya sea por la organización del combustible sólido en la pila dentro de la cámara de combustión (Leña, carbón, briquetas macizas o multitubulares) o por la creación artificial de dispositivos de gasificación que conectados con la parrilla del combustible, aseguran la macro multitubularidad deseada (combustibles sin densificar con cualquier grado de granulometría), es importante señalar que los dispositivos de gasificación o gasificadores, constituyen la opción más integral y generalizadora de formación de una tecnología para la gasificación-combustión de cualquiera de los estados en que se encuentren las biomásas, con elevados valores de los índices fundamentales de combustión. (Infante, 2011).

2.3.2 Determinación del índice de transformación de las biomásas en el proceso de gasificación (ψ).

En el experimento realizado. (Fundora ,2009), se determinó el índice de combustión promedio (ICP) en briquetas tubulares y multitubulares de aserrín de madera y otras biomásas no leñosas, utilizando una balanza de precisión para medir la masa media de las briquetas en combustión-gasificación, para intervalos de tiempos determinados, hasta que las biomásas constituyentes se transformaron en cenizas. El resultado de este proceso es la característica de comportamiento de las briquetas de una biomasa dada y con una geometría determinada durante el tiempo de la gasificación-combustión. No obstante es obvio, que las condiciones para este experimento no son las más adecuadas (Fuera de Cámara) para la garantía de una combustión eficiente. Sin embargo fue un interés, la combustión con llamas de las briquetas y las consideraciones importantes se centraron en los valores de (ICP) y el tiempo transcurrido en la combustión (Proceso de Gasificación). Por cuanto el índice de transformación de las biomásas representa la relación entre la pérdida absoluta de masa de la briqueta (Diferencia de la masa inicial de la briqueta con la masa medida en la

balanza, correspondiente al fin de la combustión con llamas), respecto a la masa inicial.

$$\psi = \frac{w_0 - w_f}{w_0} = \left(1 - \frac{w_f}{w_0} \right) \quad (\text{ec.2.1})$$

Donde:

$\psi \Rightarrow$ Coeficiente de transformación del sólido en gasificación- combustión.

$w_0 \Rightarrow$ Masa inicial de la briqueta antes de la combustión, (g).

$w_f \Rightarrow$ Masa final de la briqueta hasta el fin de la combustión con llamas, (g).

La Figura 2.3 Muestra la característica de comportamiento de la masa de una briqueta multitubular de aserrín de madera (leña) de $\left(\frac{d}{D} eq = 0.3 \right)$ y 15% de humedad.

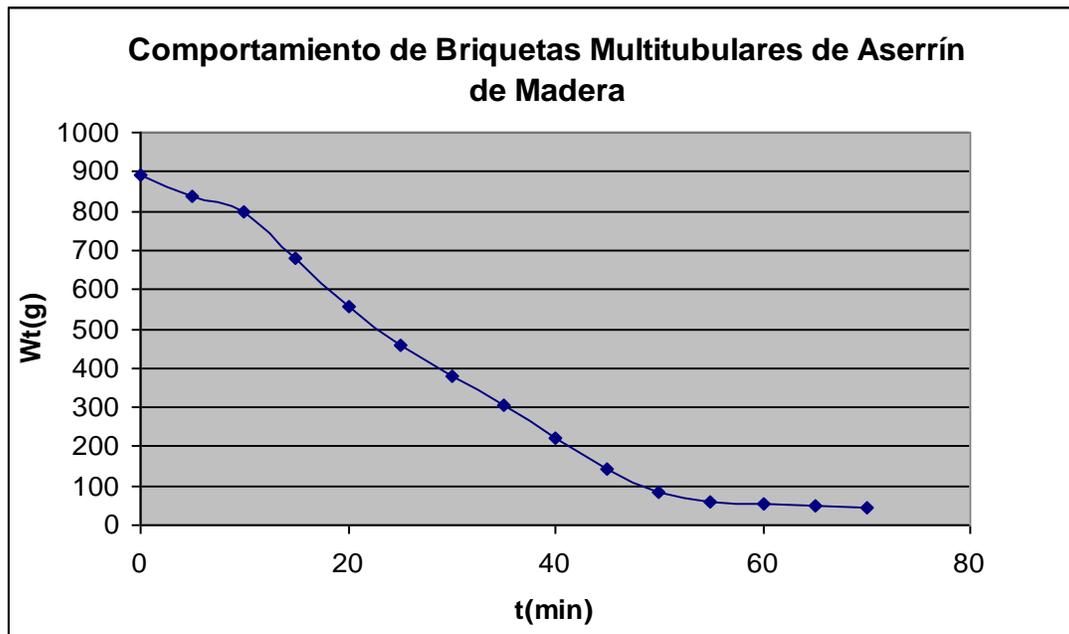


Fig. 2.3 Característica de comportamiento de la briqueta multitubular de aserrín de madera con 15% de humedad, densidad, $\rho=550 \text{ kg/m}^3$, diámetro de la leña $D=100\text{mm}$ y masa $w_0= 898\text{g}$.

La característica de comportamiento mostrada en la figura 2.3 puede ser representada por un modelo físico matemático de la forma siguiente:

$$(ec.2.2)$$

Donde:

$b_0 = \%ceniza \cdot w_0 \Rightarrow$ Representa el límite inferior de la función matemática, (g).

$b_1 = w_0 - b_0 \Rightarrow$ Representa el rango de definición de la función matemática, (g).

$c_1 \Rightarrow$ Característica de comportamiento de la curva, determinada por el tipo y estado de la biomasa, $\frac{d}{D}^{eq}$ y de otros factores físicos inherentes a la misma (min^{-1}).

$t \Rightarrow$ Tiempo, (min).

La constante c_1 se determina, linealizando la función matemática exponencial (2.2).

$$L_n \ln(w_t - b_0) = L_n b_1 - c_1 \cdot t \quad (ec.2.3)$$

Equivalente a la ecuación lineal.

$$y = A + B \cdot X \quad (ec.2.4)$$

Donde:

$$A = L_n b_1$$

$$B = -c_1$$

Derivando la ecuación (3.2).

$$v_g = \frac{dw_t}{dt} = -b_1 \cdot c_1 \cdot e^{-c_1 \cdot t}, \text{ (g/min)} \quad (\text{ec.2.5})$$

Donde:

$v_g \Rightarrow$ Representa la pérdida instantánea de masa o el valor instantáneo del índice de gasificación.

Masa efectiva absoluta de gas que se genera en el proceso de gasificación.

$$\Delta W = \int_{t_1}^{t_2} V_g \cdot dt \quad (\text{ec.2.6})$$

$T_1 = 5\text{min}$ (Tiempo medio necesario para la ignición del combustible).

$T_2 \Rightarrow$ Se obtiene de la ecuación (2.5) y de los experimentos realizados por. (Fundora ,2009), donde se considera que valores de $v_g \leq 3\text{g}/\text{min}$, finaliza la combustión con llamas y el aporte energético del carbón libre de las briquetas no tiene importancia energética.

$$v_g = 3.5 \text{ g}/\text{min}$$

$$3.5 = -b_1 \cdot c_1 \cdot e^{-c_1 \cdot t_2} \quad (\text{ec.2.7})$$

Linealizando la ecuación (2.5)

$$\text{Ln} \left(\frac{3.5}{b_1 \cdot c_1} \right) = -c_1 \cdot t_2$$

$$t_2 = \frac{\text{Ln} \left(\frac{3.5}{b_1 \cdot c_1} \right)}{c_1}$$

$$|\Delta w| = \frac{\ln\left(\frac{3.5}{b_1 \cdot c_1}\right)}{c_1} \int_5^{c_1} -b_1 \cdot c_1 \cdot e^{-c_1 t} \cdot dt$$

$$|\Delta w| = b_1 \cdot e^{-c_1 t} / 5^{c_1} \quad (\text{ec.2.8})$$

$$\psi = \frac{|\Delta w|}{w_0} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} v g \cdot dt}{w_0} \quad (\text{ec.2.9})$$

De la evaluación de la ecuación (2.2) para diferentes valores de (w_t) y del tiempo (t) se obtienen los valores de (c_1) para briquetas de diferentes relaciones de diámetros y diferentes biomásas.

En la tabla 2.3 Se exponen los valores de c_1 para diferentes relaciones $\left(\frac{d}{D}eq\right)$.

Biomásas	c_1						
	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	$\left(\frac{d}{D}eq\right)$
Paja de Caña	0.025	0.033	0.047	0.068	0.077	0.087	$\left(\frac{d}{D}eq\right)$
Cáscara de Café	0.04	0.047	0.054	0.073	0.082	0.093	$\left(\frac{d}{D}eq\right)$
Aserrín (Madera)	0.044	0.053	0.065	0.086	0.094	0.103	$\left(\frac{d}{D}eq\right)$

Utilizando regresión lineal simple.

$$c_{1PajaCaña} = -0.0033 + 0.13 \cdot \frac{d}{D} eq \text{ (ec.2.10)}$$

$$c_{1CáscaraCafé} = 0.016 + 0.11 \cdot \frac{d}{D} eq \text{ (ec.2.11)}$$

$$c_{1AserrínMadera} = 0.017 + 0.125 \cdot \frac{d}{D} eq \text{ (ec.2.12)}$$

En la tabla 2.4 Se muestran los valores de ψ para briquetas de biomasa con $\frac{d}{D} eq = (0.3; 0.5)$ y una masa inicial $w_0 = 1000g$.

Tabla 2.4 Valore de ψ para briquetas de biomasa

Biomasa	$\frac{d}{D} eq$	b_1 (g)	c_1 (min^{-1})	t_2 (min)	Δw (g)	Δt (min)	ICP (g/min)	ψ
Paja de Caña	0.3	950	0.033	170	802	165	5	0.80
	0.5	950	0.068	82	673	77	8.7	0.67
Cáscara de Café	0.3	970	0.047	120	763	115	6.7	0.76
	0.5	970	0.073	77	670	72	9.3	0.67
Aserrín (Madera)	0.3	990	0.053	106	756	101	7.5	0.75
	0.5	990	0.086	66	640	61	10.6	0.64

Cuando las biomasa son sin densificar, se requiere provocar la multitubularidad, mediante el empleo de gasificadores distribuidos convenientemente en la sección transversal de la parrilla, lo que asegura la relación $(\frac{d}{D} eq)$. Sin embargo se ha demostrado experimentalmente que el índice de combustión promedio (ICP) así como la intensidad de la gasificación (V_g) dependen de las dimensiones de la cámara de combustión, así como del área perimetral de cada gasificador o conducto de gasificación, fundamentalmente de este último. (Infante, 2010).

$$A_{gasif.perim} = \pi \cdot D \cdot z \cdot H, (m^2) \quad (ec.2.13)$$

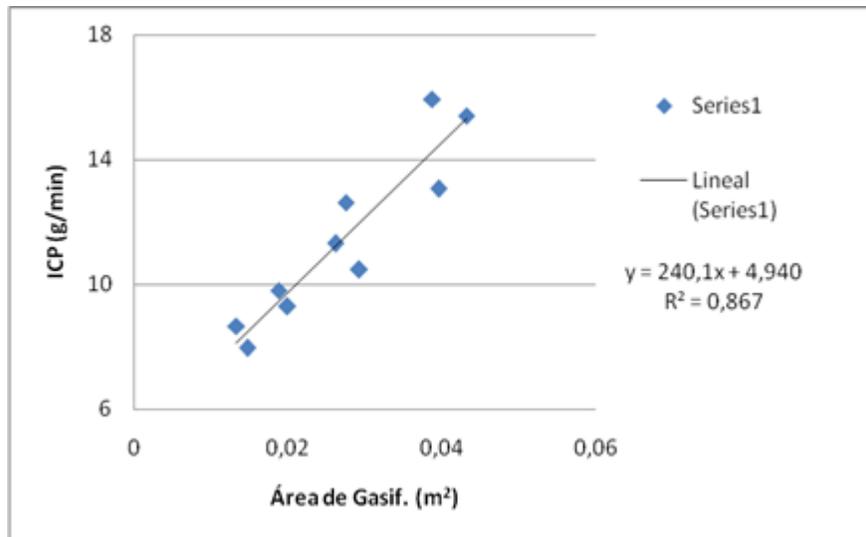
Donde:

D ⇒ Diámetro del gasificador, (m).

z ⇒ Número de gasificadores.

H ⇒ Altura efectiva de los gasificadores, (m).

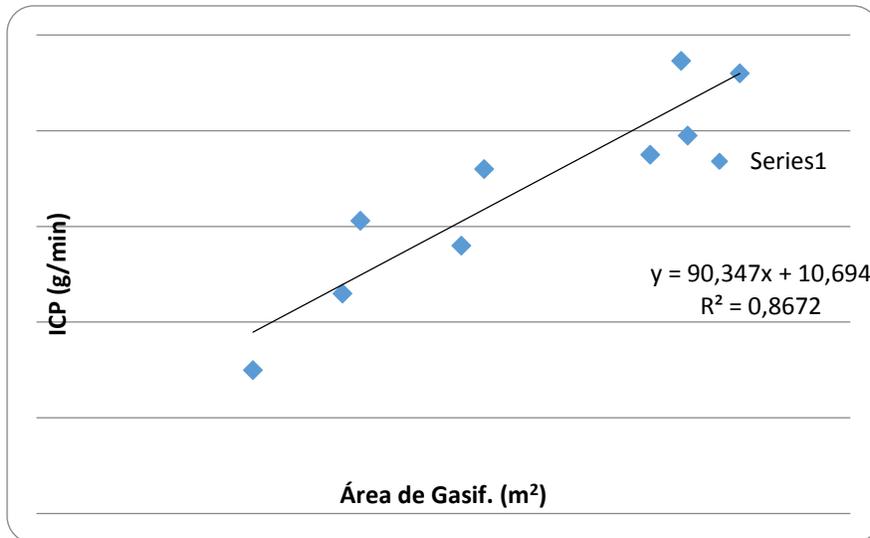
En la figura 2.4 Se muestra el experimento realizado con Cáscara de Café, con briquetas multitubulares, (Infante, 2010), se denota una correspondencia lineal entre el índice de combustión promedio (ICP) y el $A_{gasif.perim}$ del gasificador.



La figura 2.4 Muestra la característica de comportamiento entre el ICP y el A_{prim} del gasificador.

$$ICP = 90.31 \cdot A_{gasif.perim} + 10.69$$

En la figura 2.5 Se muestra el experimento realizado con Aserrín de Madera, con briquetas multitubulares, (Infante, 2010), se denota una correspondencia lineal entre el índice de combustión promedio (ICP) y el $A_{gasif.perim}$ del gasificador.



La figura 2.5 Muestra la característica de comportamiento entre el ICP y el A_{perim} del gasificador.

$$ICP = 241 \cdot A_{\text{gasif. perim}} + 4.92$$

No obstante el índice de combustión promedio puede ser determinado utilizando el índice de transformación (ψ) de la ecuación (2.9) determinado para una masa unitaria según los experimentos y multiplicado por la masa total disponible en la cámara de combustión.

$$|\Delta w| = \psi \cdot w_{\text{total}}, \text{ (g)} \quad (\text{ec.2.14})$$

$$ICP = \frac{|\Delta w|}{\Delta t} = \frac{\psi \cdot w_{\text{total}}}{\Delta t} \quad (\text{ec.2.15})$$

$$\Delta t = t_2 - t_1$$

$$\Delta t = -\frac{\text{Ln}\left(\frac{3.5}{b_1 \cdot c_1}\right)}{c_1} - 5, \text{ (min)}$$

Donde:

$w_{total} \Rightarrow$ Masa total de combustible en la cámara, (g).

$$b_1 = w_t - b_0$$

Determinación de la energía del proceso de gasificación.

$$E_{gasif} = V_g \cdot \psi \cdot w_{total} \quad , \text{ (kJ)} \quad \text{(ec.2.16)}$$

Donde:

$V_g \Rightarrow$ Valor calórico del gas, kJ/kg, combustible.

Según ASME el valor calórico de los gases de la gasificación de la biomasa.

$$V_g = 5.6 \frac{Mj}{m^3} = 5600 \frac{kJ}{m^3} = 3733 \frac{kJ}{kg} \quad (\text{Entre } 5-7 \frac{Mj}{m^3}).$$
 Libro de combustión, si

las condiciones de combustión son óptimas el V_g del biogás es igual a $7 \frac{Mj}{m^3}$ lo que indica un 25% mayor que el valor calculado en las tesis anteriores

$$V_g = 7 \frac{Mj}{m^3} = 4666 \frac{kJ}{kg}$$

Potencia térmica del proceso de gasificación.

$$N_{gasif} = 0.06 \cdot V_g \cdot ICP \quad , \text{ (kJ/h)} \quad \text{(ec.2.17)}$$

$$N_{gasif} = 1.66 \cdot 10^{-5} \cdot V_g \cdot ICP \quad , \text{ (kW)} \quad \text{(ec.2.18)}$$

Donde:

$ICP \Rightarrow$ Índice de Combustión Promedio, (g/min).

$V_g \Rightarrow$ Valor calórico de los gases de la gasificación, (kJ/kg).

Si se conoce la potencia necesaria en la aplicación y se desea dimensionar la macro multitubularidad requerida, para lograrla es importante tomar en consideración los resultados de los experimentos del índice de combustión (ICP).

$ICP = 241 \cdot A_{gasif.perim} + 4.92 \Rightarrow$ Para biomásas leñosas (Aserrín de Madera o leña).

$ICP = 90.31 \cdot A_{gasif.perim} + 10.69 \Rightarrow$ Para biombras no leñosas (Cáscara de Café, Bagazo de Caña etc.).

Área de gasificación perimetral del gasificador.

$$A_{gasif.perim} = z_1 \cdot \pi \cdot d_{gasif} \cdot H_{gasif}, (m^2) \quad (ec.2.19)$$

Donde:

$z_1 \Rightarrow$ Número de gasificadores.

$d_{gasif} \Rightarrow$ Diámetro del gasificador, (m).

$H_{gasif} \Rightarrow$ Altura efectiva del gasificador, (m).

Despejando la ecuación (2.17).

$$ICP_{nec} = \frac{16.66 \cdot N_{gasif}}{V_g}, (g/min)$$

Donde:

$N_{gasif} \Rightarrow$ En (kJ/h).

Despejando la ecuación (2.18).

$$ICP_{nec} = \frac{6 \cdot 10^4 \cdot N_{gasif}}{V_g}, (g/min)$$

Donde:

$N_{gasif} \Rightarrow$ En (kW).

Para biombras leñosas (leña).

$$A_{gasif.perim} = \frac{ICP - 4.92}{241}, (m^2) \quad (ec.2.20)$$

Si se asume $\frac{d}{D} eq = 0.3:0.7$.

$$\frac{d}{D} eq = \sqrt{z_1} \cdot \frac{d}{D}$$

Y se dispone del diámetro de la cámara de combustión.

$$\left(\frac{d}{D} eq\right)^2 = z_1 \cdot \frac{d}{D}$$

Como el área de gasificación perimetral.

$$A_{gasif.perim} = \pi \cdot z_1 \cdot d \cdot H_{gasif}$$

$$\pi \cdot z_1 \cdot d \cdot H_{gasif} = \frac{ICP - 4.92}{241}$$

$$\pi \cdot \left(\frac{d}{D} eq\right)^2 \cdot D \cdot H_{gasif} = \frac{ICP - 4.92}{241}$$

$$H_{gasif} = \frac{ICP - 4.92}{241 \cdot \left[\pi \cdot \left(\frac{d}{D} eq\right)^2 \cdot D \right]}, \text{ (m)}$$

Volviendo al área de gasificación perimetral inicial.

$$z_1 \cdot d = \frac{A_{gasif.perim}}{\pi \cdot H_{gasif}}$$

Asumiendo (z_1 o d) se obtiene la magnitud deseada.

Si se considera que la altura H_{gasif} resulta muy elevada para sus propósitos, dimensionarla a sus necesidades y ajuste la correlación ($z_1 \cdot d$) de la ecuación precedente.

Tenga presente que resulta más favorable un elevado número de gasificadores (z_1) con menor diámetro (d) que lo contrario, sobre todo cuando se utiliza la biomasa sin densificar. Esto no es ajeno a la correcta distribución del aire secundario.

La energía que aporta el combustible en las condiciones de la cámara de combustión con tales dimensiones de los gasificadores puede ser determinada por la siguiente expresión matemática.

A partir de la ecuación (2.16). (González, 2011).

$$E_{gasif} = V_g \cdot \psi \cdot w_t \quad , \text{ (kJ)}$$

$$w_t = \rho_0 \cdot V_{ef} \text{ (ec.2.21)}$$

Donde:

$W_t \Rightarrow$ Masa total de combustible sólido, (kg).

$\rho_0 \Rightarrow$ Densidad aparente del combustible utilizado, (kg/m³).

$V_{ef} \Rightarrow$ Volumen efectivo para el combustible, (m³).

$$V_{ef} = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \left[1 - z_1 \left(\frac{d}{D} \right)^2 \right] \cdot H_{gasif}$$

(ec.2.22)

Sustituyendo en la ecuación (2.16).

$$E_{gasif} = 0.785 \cdot V_g \cdot \psi \cdot H_{gasif} \cdot D^2 \left[1 - z_1 \left(\frac{d}{D} \right)^2 \right]$$

Donde:

$d \Rightarrow$ Diámetro del gasificador, (m).

$z_1 \Rightarrow$ Número de gasificadores.

$D \Rightarrow$ Diámetro de la cámara de combustión, (m).

$\psi \Rightarrow$ Coeficiente de transformación.

Determinación de las dimensiones de los gasificadores y conductos de aire secundario.

Experimentos realizados, que demostraron que la relación del área de alimentación de aire secundario respecto al área de los gasificadores.

$$\delta = \frac{A_{secund.}}{A_{gasif}} \quad (\text{ec.2.23})$$

$$0.85 \leq \delta \leq 2$$

Experimentalmente se demostró que a partir de $\delta = 0,85$ el proceso de gasificación- combustión de los gases no tuvo dificultades, sin embargo el aseguramiento incondicional del proceso de gasificación se logró con estrangulación del aire de alimentación en una magnitud inferior al 20%, lo que corresponde a reducir la sección del conducto en esa magnitud, para las condiciones del fogón objeto de experimento.

El conducto de alimentación de aire principal debe de estar en una relación con respecto al área de gasificación ($\text{Área de alimentación} / \text{Área de gasificación}$) = (0.2: 0.5) con la posibilidad de regulación por estrangulación del mismo. Esta alternativa se corresponde con la suposición de que el aire de alimentación principal es totalmente para la gasificación. Si los conductos de aire secundario reciben aire de la misma fuente, es de esperar que el flujo de aire a los gasificadores sea menor y con un buen control del proceso, se asegura el punto adecuado para la gasificación eficiente del combustible sólido en cuestión.

Conclusiones parciales

1. La definición del modelo exponencial de la pérdida de masa en briquetas tubulares y/o multitubulares permitió determinar el índice de transformación (Gasificación) en función de la multitubularidad del combustible.
2. El aporte fundamental de energía corresponden a los gases combustibles, de ahí la importancia de su valor calórico.
3. El índice de combustión promedio por unidad de área perimetral del conducto de gasificación, es fundamental para la determinación de la potencia térmica del horno.
4. El concepto de multitubularidad se puede aplicar a cualquier combustible sólido utilizado.
5. El proceso de gasificación puede ser regulado regulando el aire de alimentación.
6. Se obtuvo una metodología para el diseño de horno de gasificadores.

Capítulo 3

Metodología de diseño de hornos gasificadores de biomasa, utilizando el principio de la multitubularidad natural o provocada.

3. Introducción

El hombre como ente natural, dotado de inteligencia, en muchas ocasiones ha invertido gran parte de su tiempo de vida en intentar dominar la naturaleza, con un derroche de recursos muy elevado y con más perjuicios que beneficios, ha desechado la contemplación viva de la misma y ha violado sus leyes fundamentales. Los fuegos espontáneos que tienen lugar en los bosques, cañaverales o pastizales, así como los que el hombre provoca para hacer rituales religiosos, protegerse del crudo invierno o de los depredadores naturales, son ejemplos claros del comportamiento natural del proceso de gasificación de las biomásas. Si se observa con detenimiento la forma en que están organizadas las biomásas, antes de proceder a la combustión se puede comprobar, que la pila de biomasa forma una macro multitubularidad visible y que la mayor intensidad de las llamas sin humo, tienen lugar, donde más visible sea esta tubularidad (Mayor granulometría y desorden en la pila de biomasa residual o la pila de leña), cuando la biomasa residual es de pequeña granulometría, compactada o la leña está bien organizada (Micro multitubularidad), la combustión es con gran dificultad y la presencia de gran cantidad de humo es lo más característico del proceso, si equivocadamente se utiliza en una aplicación, esta alternativa, presupone crear las condiciones apropiadas para la efectividad de la combustión y ello está ligado al empleo de costosas tecnologías y a una esmerada preparación del combustible igualmente costoso, para lograr una combustión con elevados índices de eficiencia, tal es el caso de la combustión en lecho fluidizado, la combustión de capa fina con cono deslizante, quemadores de sólidos, complejos sistemas de gasificación, etc. La combustión en pila de capa gruesa en estas condiciones resulta totalmente ineficiente. De la contemplación de lo que acontece en la naturaleza desde el punto de vista de la combustión, se desprende una importante conclusión. La multitubularidad es un principio de la naturaleza y está presente en la mayoría de lo que existe en la misma, en unos casos como capilaridad (Micro multitubularidad) y en otros como macro multitubularidad, este último es esencial para un efectivo y productivo proceso de gasificación, provocarlo en una aplicación

es la garantía de simplificar y abaratar las tecnologías para el empleo racional y eficiente de las biomásas. (González Dávila, Oriel, 2011).

3.1 Dimensionado preliminar de una cámara de combustión con sus dispositivos de gasificación-combustión.

3.1.1 Dimensionamiento de la Cámara de Combustión.

- a) En función de la potencia térmica requerida en la aplicación.
- b) Según la eficiencia térmica que se desee obtener en la misma.

3.1.2 Forma geométrica de la Cámara de Combustión.

1. Prismática.
2. Cilíndrica.

La cilíndrica hace una mejor distribución de la energía térmica generada por el proceso de gasificación-combustión.

La forma geométrica de la cámara de combustión no es lo esencial para la garantía de un funcionamiento adecuado del proceso de gasificación-combustión en el interior de la misma, si no la macro multitubularidad presente en el combustible, así como la garantía de suficiente aire secundario para la combustión total de los gases combustibles generados en el proceso de gasificación.

Los resultados de investigaciones experimentales, muestran los rangos más aceptables de las relaciones entre el aire secundario y los gases combustibles, referirse a la ecuación (2.25). González Dávila, Oriel, (2011).

Si $\delta = 1$ presupone que $A_{\text{secund.}} = A_{\text{gasif.}}$ y el área por donde debe circular el aire de alimentación (A_t), $A_t = 2 \cdot A_{\text{gasif.}}$, y ello implica que en estas condiciones $A_{\text{gasif.}} = \frac{A_t}{2}$, y de igual forma ocurrirá para el aire secundario. De modo que $\delta = 1,2$ representa el punto de partida para diseñar una cámara de combustión con las mejores condiciones térmicas.

Resultados de investigaciones experimentales precedentes, demostraron en briquetas tubulares y multitubulares que la relación entre el área de gasificación

(A_{gasif}) y el área de la sección exterior de la briqueta ($A_{\text{cám}}$), $\lambda_{eq} = \frac{A_{\text{gasif}}}{A_{\text{cám}}} = 0.3:0.7$

.Esta condición supone una independencia entre el aire primario (Aire para la gasificación) y el aire secundario (Aire para la combustión de los gases de la gasificación). FundoraAcea, Irving (2009).

Si se diseña una cámara de combustión que tenga independencia de suministro de aire primario (Parte inferior de la parrilla) y el aire secundario (Parte superior de la cámara de combustión). Las dimensiones de la cámara se ajustan estrictamente

a la relación $\lambda_{eq} = \frac{A_{gasif}}{A_{cám}}$, y ello dependerá de la elección de una u otra de las magnitudes (A_{gasif} o $A_{cám}$).

$$A_{gasif} = (0.3 : 0.7) A_{cám} \quad (\text{ec.3.1})$$

$$A_{cond} \leq 0.20 \cdot A_{gasif} \quad (\text{ec.3.2})$$

Existe la otra alternativa, donde el suministro de aire de alimentación se distribuye como aire primario a la gasificación y aire secundario a la combustión de los gases generados en el proceso de gasificación. Esta alternativa debe combinar la

relación, $\delta = \frac{A_{secund}}{A_{gasif}} = (0.85 : 2)$ y la relación $\lambda_{eq} = \frac{A_{gasif}}{A_{cám}} = (0.3 : 0.7)$.

En las figuras 3.1 y 3.2, se muestran distintos tipos de gasificadores.

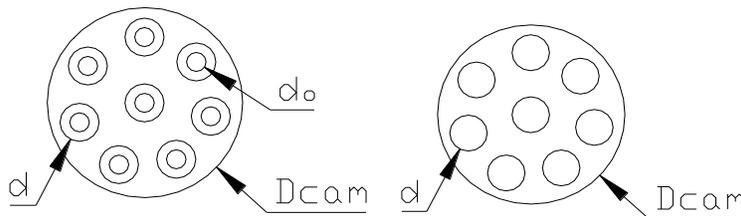


Figura 3.1

Figura 3.2

Para la figura (3.1), se utiliza la siguiente ecuación.

$$A_t = A_{gasif} + A_{secund} \quad (\text{ec.3.3})$$

$$A_t = \frac{z_1 \cdot \pi \cdot d^2}{4} \left[1 - \left(\frac{d_0}{d} \right)^2 \right] + \frac{z_2 \cdot \pi \cdot d_0^2}{4}, (\text{m}^2)$$

Donde:

$d \Rightarrow$ Diámetro del conducto de gasificación.

$d_0 \Rightarrow$ Diámetro del conducto de aire secundario.

$z_1 \Rightarrow$ Número de conductos o de gasificadores para hornos.

Para el caso de la figura (3.2) se utiliza la siguiente ecuación.

$$A_t = A_{gasif} = \frac{z \cdot \pi \cdot d^2}{4}, (\text{m}^2) \quad (\text{ec.3.3})$$

Cuando el conducto de la cámara es de sección circular se utiliza la ecuación.

$$A_{cám} = \frac{\pi \cdot D_{cám}^2}{4}, (\text{m}^2) \quad (\text{ec.3.5})$$

Cuando el conducto de la cámara es de sección cuadrada o rectangular.

$$A_{cám} = L \cdot A, (\text{m}^2) \quad (\text{ec.3.6})$$

La variante (fig.3.1) se corresponde con la alternativa que se analiza. Esta alternativa es básicamente para la utilización de combustibles sin densificar (aserrín de madera, hojas, cáscara de arroz, cáscara de café, bagazo de caña, etc.) con gasificadores (Multitubularidad provocada). Si en estas condiciones se utiliza leña en trozos o briquetas de cualquier característica los gasificadores y conductos de aire secundario son favorables al incremento del aire secundario en

cualquiera de las variantes utilizadas y el área de gasificación se debe determinar con la organización de estos combustibles en los espacios dejados por estos conductos y el área total de la cámara de combustión. Ello presupone valores elevados de $(\lambda = \frac{A_t}{A_{comb}})$ y $\delta = \frac{A_{secund}}{A_{gasif}}$.

Para esta alternativa el área del conducto de alimentación de aire puede ser mayor que el 20%* A_t y siempre se debe colocar un dispositivo de estrangulación para optimizar la regulación del flujo de aire de alimentación.

3.1.3 Metodología para el dimensionado de la cámara de combustión y dispositivos de gasificación.

- 1- Elección de los coeficientes $\lambda_{eq} = \frac{A_{gasif}}{A_{cám}} = [0.3:0.7]$ y $\delta = \frac{A_{secund}}{A_{gasif}} = [0.85:2]$.
- 2- Elegir el número de gasificadores (z_1) y de su diámetro (d), según el área de gasificación (A_{gasif}), preliminarmente asumir $\delta = 1$ donde $A_{secund} = A_{gasif}$
- 3- Elegir el número (z_2) de conductos de aire secundario y su diámetro (d_0), a partir del área de aire secundario (A_{secund}).
- 4- La altura de los gasificadores debe ser igual o superior a la altura del combustible.
- 5- El área del conducto de aire de alimentación debe ser igual o inferior al 20% del área total de circulación de aire en la cámara de combustión (A_t).

$$A_t = A_{gasif} + A_{secund}$$

- 6- La cámara de combustión puede ser metálica con aislamiento refractario (Lana de vidrio o Arcilla) o puede ser de refractario completamente, con las hornillas (Hendidadas o Planas) metálicas.
- 7- La leña en trozos o las briquetas de biomasa residuales, no superiores a 150mm de longitud y diámetros inferiores a 120mm.

3.2Diseño del horno gasificador biomasa como combustible fundamental.

3.2.1Principio de la macro multitubularidad.

El diseño de un horno con el principio de la multitubularidad. Comienza por el conjunto que asegura el proceso de gasificación y combustión de modo que el número, dimensiones y colocación de los trozos de leña aseguran los conductos de gasificación necesarios para dar respuesta a una demanda determinada de energía y potencia calorífica deseada. Los demás factores involucrados son los responsables de la manipulación, aseguramiento del flujo de aire, gases y del grado de aprovechamiento del calor en sus diferentes manifestaciones (convección, conducción y radiación).

La parrilla con los trozos de la leña organizados convenientemente contribuye en el aseguramiento del proceso de gasificación-combustión, de ahí la necesidad de determinar convenientemente las siguientes relaciones $\lambda = \frac{d}{D} eq$ y

$$\delta = \frac{A_{secund}}{A_{gasif}} = 0.85 : 2$$

3.3Calculo del número de gasificadores y del área perimetral de un gasificador. (Para 1Mw de potencia)

Variante N-1

Donde:

3.3.1Área perimetral de un gasificador.

3.3.2Calculo de (ICP) total.

3.3.3 Utilizando la ecuación para (biomasa leñosa).

Despejando

3.3.4 Hallar el número de gasificadores.

3.3.5 Diámetro de la cámara de combustión

—

3.3.6 Cálculo del área de gasificación.

3.3.7 Área total del Horno

3.3.8 Aire secundario.

Donde:

3.3.9 -Aire terciario

Asumiendo

Conductos de aire terciario.

Variante N-2

Dónde: (1Mw)

Aumento de la altura de los gasificadores

—

Tabla 3.1 Resultados de la variante 2

A per un gasificador	ICP	A gasif per	Numero de gasif	D del horno	A de gasificación	A total

En la variante 2 se puede apreciar que aumento al doble la altura de los gasificadores se logra una reducción con respecto a la variante 1 donde la variante 1 tenía 140 gasificadores para una potencia de 1 Mw y un área total de

Variante N-3

Donde:(5Mw de potencia)

—

Tabla 3.2 Resultados de la variante 3

A per un gasificador	ICP	A gasif per	Numero de gasif	D del horno	A de gasificación	A total

Variante N-4

Donde:(5Mw de potencia)

Aumento del diámetro de los gasificadores

—

Tabla 3.3 Resultados de la variante 4

A per un gasificador	ICP	A gasif per	Numero de gasif	D del horno	A de gasificación	A total

3.4-Cálculo de la masa de combustible.

—

—

Se utiliza para el cálculo de energía la masa de combustible menor.

3.5-Cálculo de la Energía del proceso de gasificación.

$$E_{gasif} = V_g \cdot \psi \cdot w_{total.comb} \quad (\text{ec. 3.7})$$

Donde:

$w_{total.comb} \Rightarrow$ Masa total de combustible sólido, (kg).

$V_g \Rightarrow$ Valor calórico del gas (kj/kg).

Según ASME el valor calórico de los gases de la gasificación de la biomasa es.

Se muestra en la tabla 2.4 del capítulo 2(Aserrín de madera)

Conclusiones parciales:

1. El concepto de multitubularidad se puede aplicar a cualquier combustible sólido utilizado.
2. El proceso de gasificación puede ser regulado, regulando el aire de alimentación.
3. Se obtuvo una metodología para el diseño de horno gasificadores.
4. El aporte fundamental de energía corresponden a los gases combustibles de ahí la importancia de su valor calórico.

Capítulo 4

Análisis preliminar del costo del horno de gasificación.

4.1 Análisis económico.

El presente epígrafe muestra el estudio de factibilidad económica de fabricación del horno gasificador de uso industrial, teniendo en cuenta que su objetivo principal es garantizar que la necesidad de acometer la inversión señalada, esté plenamente justificada y que las soluciones técnico-económicas sean las más ventajosas para la empresa procurando:

El valor de las materias primas.

Materiales auxiliares empleados en la fabricación del horno.

La parte de los activos fijos tangibles que se transfieren en el producto en forma de depreciación.

El valor de la energía consumida.

Los gastos indirectos y otros gastos.

Los gastos relacionados con el trabajo humano, que compensa los valores de los productos para sí.

El costo de producción tiene vital importancia en el control de los gastos de fabricación del horno. En este se incluyen los gastos de materias primas y materiales auxiliares empleados, los gastos de fuerza de trabajo, la parte de los activos fijos tangibles que se transfieren al producto en forma de depreciación, el valor de la energía consumida, los gastos por concepto de seguridad social, así como otros gastos en la fabricación.

El costo como categoría económica expresa la eficiencia en el trabajo, constituye un indicador generalizador de la calidad y permite comparar la producción obtenida y la magnitud de los gastos incurridos en su fabricación, reflejado en el ahorro de los recursos materiales, humanos y financieros.

4.2 Costo de materiales.

Los bienes materiales son los más importantes del costo de producción, desde el punto de vista cuantitativo-monetario. Esto representa el valor de todas las materias primas y materiales que se integran y consumen en el proceso de producción.

En la fabricación del horno se utilizaron materiales auxiliares, cuyo precio fue necesario investigar en las entidades correspondientes. El costo de materiales fue

determinado tomando en cuenta su precio de adquisición y la cantidad de unidades utilizadas.

Tabla 4.1 Listado de Materiales.

DESIGNACIÓN	MATERIAL	UM	CUC	CANT.UTIL.	CUC
Tubo de Acero inoxidable200x10	Acero inox	UN	550.00	14	7700.00
Plancha 25x1500x4500	Acero 20	T	378.00	5.22	1975.00
Malla de Acero inoxidable	Acero inox	T	1452	1.6	2320.00
Ladrillos Refractario 110x230	Arcilla Refractaria	UN	0.6	6000	3600.00
Bolsa de Cemento P-350	Cemento P-350	UN	6	100	600.00
Bolsa de Cemento Refractario	Cemento Refractario	UN	10	150	1500.00
Costos Sub. - Total					17695.00

4.2.1 Costos de materiales auxiliares.

Durante el proceso de soldadura se utilizaron:

Tabla 4.2 Costo de Electrodo.

DESIGNACIÓN	MATERIAL	UM	CUC	CANT.UTIL.	CUC
Electrodo	Acero	T	912.00	0.010	9,12
Recargo 10%					0.45

En el corte de materiales fueron utilizados el oxígeno y el acetileno. La siguiente tabla refleja el costo por unidad y el total de estos materiales.

Tabla 4.3 Costo de Oxígeno y Acetileno.

DESIGNACIÓN	UNIDADES	COSTO/UN (CUC)	COSTO TOTAL (CUC)
Balón de Oxígeno	6	1.5	9
Balón de Acetileno	4	3.6	14
Sub. - Total			5.1
Recargo 10%			2.3
Costos Total			25.3

4.3 Gasto en salario.

El salario es la expresión monetaria de la parte fundamental del producto necesario que se crea en las empresas, y se destina al consumo individual de los trabajadores, incluyendo las remuneraciones que se realicen a los obreros, a partir del fondo de salario.

La seguridad social incluye los gastos originados por la aplicación al salario de la tasa aprobada para ella. En la realización del cálculo se desglosa por los operarios que intervienen en la fabricación de cada pieza, teniendo en cuenta la tarifa horaria correspondiente a cada uno, las horas trabajadas y el gasto de salario según las mismas.

Para determinar el gasto de salario se multiplicaron las tarifas horarias por las horas que debe trabajar cada obrero, dado el salario producido por cada trabajador, y este se multiplica por el coeficiente empleado para vacaciones (9,09%) y el coeficiente empleado para la seguridad social que representa el 14% sobre la suma del salario y las vacaciones, más el 25% de impuestos sobre el salario.

El gasto total en salario y seguridad social se determinó por la suma del salario, las vacaciones y la seguridad social.

Tabla 3.4 Gasto de Salario.

OBRERO	TIEMPO (h)	TARIFA HORARIA (Pesos/h)	SALARIO +VAC. (9.09%) (Pesos)	SEGURIDAD SOCIAL (14%)	IMPUESTO DE F.T (25%)	GASTO SALARIO (Pesos)
Soldador B	10	2.02	20.03	2.80	5.01	27.84
Pailero	20	2.02	40.07	5.61	10.02	55.7
Tornero C	20	1.81	39.49	5.52	9.87	54.88
Gasto Total en Salario						138.42

4.4 Gasto generado por la amortización de los equipos.

La amortización es el traspaso del valor de los medios de trabajo, a medida que se desgastan, a los productos que se elaboran y la utilización de ese valor para la reproducción ulterior de los fondos fijos de producción.

Los descuentos de amortización representan el valor en forma monetaria de los fondos fijos en funcionamiento, traspasado a la producción elaborada y se incluye en el costo de producción. Con la amortización se persigue acumular recursos para reponer el gasto de los fondos fijos durante su tiempo de explotación, así como restituirlos totalmente cuando se les da de baja en la producción.

La amortización incluye los gastos calculados a partir del valor inicial de los activos fijos tangibles, aplicándole las tasas de amortización establecidas para cada equipo.

Para la realización del cálculo que se refleja en la tabla siguiente, se tomaron en cuenta los precios de los equipos, el % establecido para cada uno y el tiempo efectivo de utilización de los mismos.

Costo de Amortización.

$$CA = \frac{\text{Precio Maq.herramienta.}}{\text{Vida.útil.máquina}} * \text{tiempo.utilizada}$$

Tabla 4.4 Amortización de Equipos.

MÁQUINA	PROCEDENCIA	PRECIO (CUC)	VIDA ÚTIL (h)	AMORT. HORARIA	TIEMPO EFECT.	GASTO (CUC)
Rectificador de Soldadura	Rusia	1748.48	15 000	0.015	10	1.16
Torno 16 K20	Rusia	117 235	20 000	0.305	5	29.30
Equipo de Oxicorte	Rusia	138 60	9 000	0.301	5	7.7
Total						38.16

4.5 Costo por el consumo de energía eléctrica.

Fue necesario determinar la energía eléctrica necesaria de acuerdo al consumo de las máquinas herramientas utilizadas y la cantidad de horas trabajadas por cada una de ellas y teniendo en cuenta los datos aportados por la empresa eléctrica del costo kW-h= 0.09 CUC.

Tabla 4.5 Gasto en Electricidad.

EQUIPO	HORAS DE TRABAJO	GASTO EN HORAS	ENERGÍA CONSUMIDA (kW-h)	COSTO TOTAL (CUC)
Rectificador de Soldadura	10	32.00	320	28.8
Torno	5	12.97	64.85	5.83
Total				34.63

4.6 Total de gastos directos.

El total de Gastos Directos es igual a la suma de los Gastos en Materiales, Salarios, Amortización y Energía.

Gastos Directos = 17695.00 + 38.16 + 34.63 = 17767.63 CUC

Gastos Directos = 138.42 = 138.42 PESOS

4.7 Total de gastos indirectos.

Los gastos indirectos son aquellos gastos en que incurre La Empresa producto de las Gestiones de Dirección, Administración, Servicios Generales, Transporte de Personal, Iluminación, etc. los cuales hay que cargárselos a los gastos de producción. Estos se estiman como regla como el 30 % de los Gastos Directos.

Gastos Indirectos = 0.3 x Gastos Directos = 0,3 x 17767.79 = 5330.34 CUC.

Gastos Indirectos = 0.3 x Gastos Directos = 0.3 x 138.42 = 41.526 PESOS.

4.8 Costo total de fabricación del horno.

El Costo de Fabricación es definitivamente la suma de los Gastos Directos más los Indirectos.

Costo de Fabricación CUC = G.D + G.I = 17695.00 + 5330.34 = 23025.34 CUC.

Costo de Fabricación PESOS = G.D + G.I = 138.42 + 41.526 = 179.95 PESOS.

Según el cálculo estimado del costo de fabricación de horno gasificador es de 23025.34cuc y 179.95 pesos. Si se utilizan los materiales adquiridos en lugares de sus ventas para la fabricación del mismo. Como lo fundamental para que esta tecnología funcione apropiadamente, se centra en la cámara de combustión y parilla con gasificadores, si puede reducir el costo utilizando materiales metálicos de desechos o chatarras y materiales de construcción disponibles en lugar de construcción.

Conclusiones parciales:

1. Los resultados obtenidos en el presente estudio demuestran que la inversión es factible económicamente y constituye un objetivo social y de protección del medio ambiente, con un interés de la humanidad.
2. Posibilidad del diseño de adecuarse a los requerimientos y disponibilidad financiera de los usuarios.
3. Rápida recuperación de la inversión y bajo impacto medioambiental, dado a que pueden ser utilizado combustibles sin costo agregado.

Conclusiones Generales:

1. La posibilidad de uso de cualquier biomasa o combustible sólido, es la principal ventaja de dicho horno.
2. Su bajo costo e impacto ambiental permiten asegurar que es una tecnología revolucionaria con un futuro asegurado.
3. Con el aumento de la altura de los gasificadores se logra una reducción de la cantidad de gasificadores.
4. Utilizando la multitubularidad como principio básico se desarrolló una metodología para diseñar horno gasificador de combustibles sólidos, que puede ser generalizada su aplicación a cualquier tipo de tecnología de combustión - gasificación.
5. El modelo físico matemático de la pérdida de masa en el tiempo es esencial para determinar la masa de gases combustibles que se generan en un determinado combustible sólido, en función de su multitubularidad.

Recomendaciones

Recomendaciones:

1. Generalizar el uso de la metodología para el diseño de horno y equipos gasificadores, según las exigencias de los usuarios.
2. Implementar esta tecnología en el más breve plazo posible, a fin de dar soluciones energéticas y medioambientales.
3. Continuar los estudios a fin de su implementación en otras aplicaciones de mayor complejidad tecnológica, fundamentalmente para el inicio de la ignición del combustible en el proceso de combustión – gasificación.

Bibliografia

Bibliografía:

- Acosta, Alberto. (1992). *Energía, Medio Ambiente Y Desarrollo Sustentable*. (Friedrich Ebert).
- Beckermann, C. (1987). Natural convection flow and heat transfer between a fluid layer and a porous layer inside a rectangular enclosure. *Journal of heat transfer*, 109(No. 2), 363 - 370.
- Carrasco, J. E. (2008, marzo 22). Estado actual y perspectivas de las biomásas como recurso energético. Recuperado a partir de www.coiim.es/C13/ENE-FEB2008/Document%20Library/pag.3.pdf
- Collective Authors. (1990). *The briquetting of agricultural waste for fuel*.
- Collective Authors. (s. f.). *Green Pease International, Power to chance* (1995.ª ed.). Green Pease.
- Fernandez - Pello D. (1981). Flame spread in an opposed forced flow (pp. 579 - 584). Presentado en Eighteenth Symposium of Combustion.
- González, M. M. (2002). *Estudio teórico sobre la combustión heterogénea. Aplicación a la combustión de biomasa*. (Tesis de grado). Universidad de Vigo. España.
- Granada Álvarez, E. (s. f.). *Estudio de la influencia de los parámetros humedad, temperatura y presión en el proceso de densificación, mediante autoaglomeración, de biomasa lignocelulósica residual*. (Tesis Doctoral). Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y Minas, Universidad de Vigo. España.
- Grozdila, G. (1997). Biological treatment and storage method for wet bagasse for year - round supply. *International Cane Energy News*.
- Infante, Cesar. (2010). *Evaluación térmica de prototipo de estufas eficiente, para diferentes biomásas*. Universidad de Cienfuegos.

- Maruam Sambu Belo. (2014). *Diseño de fogón utilizando el principio de la multitubularidad del combustible sólido*. Univercidad de Cienfuegos.
- Mencía, V. (2011). *Metodología para el diseño de tecnologías de combustión de biomasa en pila de capa gruesa con gasificadores, empleando la Multitubularidad Natural o Provocada*. Univercidad de Cienfuegos.
- Ortiz, L., & Tabares, M. (1996). Combustibles densificados a partir de residuos ligneocelulósicos. Residuos.
- Tabarés Míguez, J. L., & González López, L. M. (2006). Combustion Behavior of Spanish Lignocellulosic Briquettes. *Taylor & Francis*. Recuperado a partir de www.informaworld.com/index/741973136.pdf -
- Toscano Morales, L.A. (2009). *Análisis de los parámetros y selección de hornos para la combustión de biomasa*. Univercidad de Ecuador.
- Verdecia T., D. (2002). *Estudio teórico de la combustión de briquetas cilíndricas de biomasa canera*. (Tesis Maestria.). Universidad de Cienfuegos.

Anexos

ANEXO No.1.



Fig. 1.1.- Biociclo de la Biomasa.

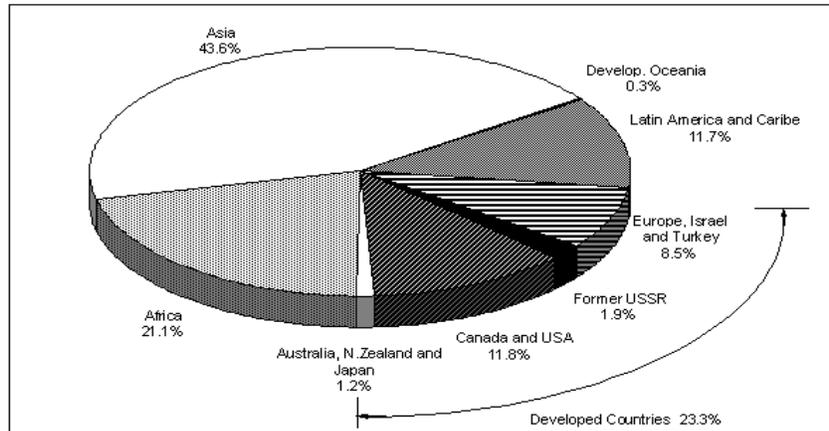


Fig. 1.2.- Utilización de la biomasa como fuente de energía en el mundo.

ANEXO No.2.

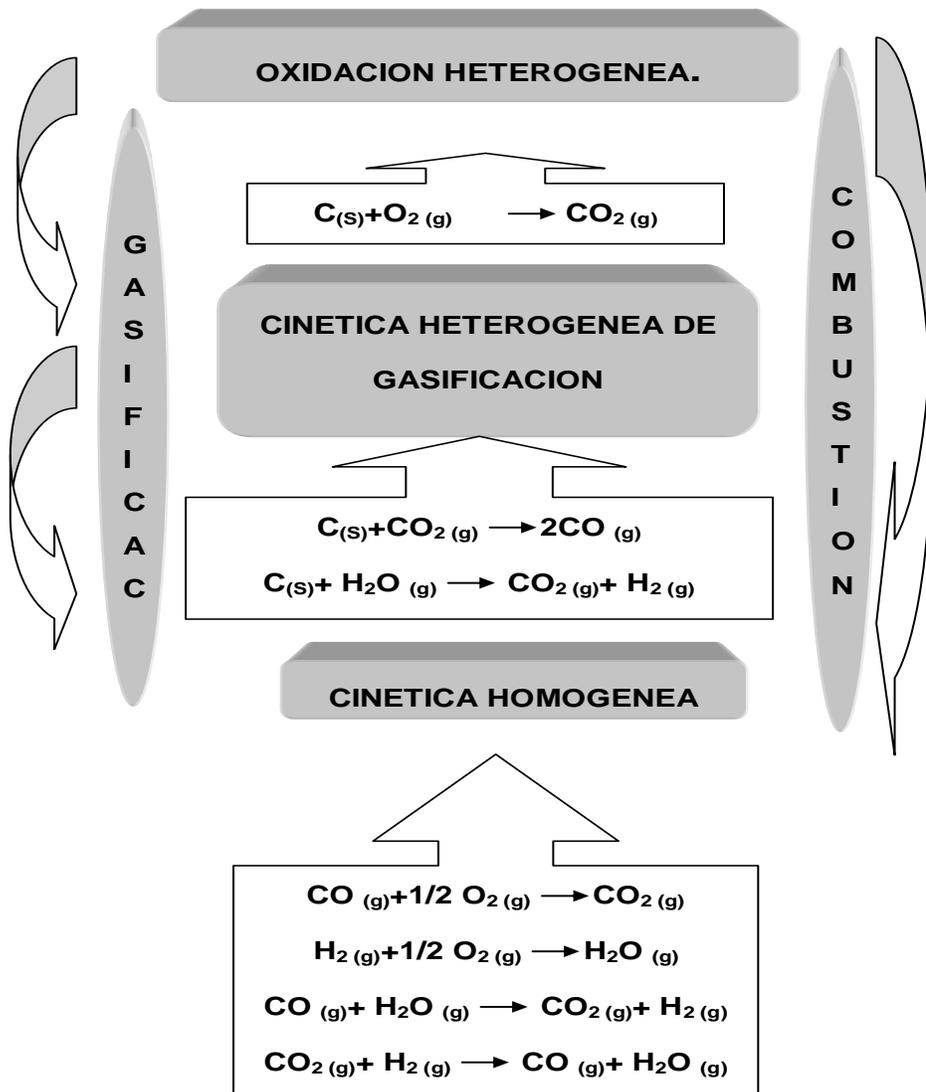


Fig. 1.3.- Gráfico del orden de ocurrencia de las reacciones en el proceso de combustión y gasificación de biomasa.

ANEXO No.3.

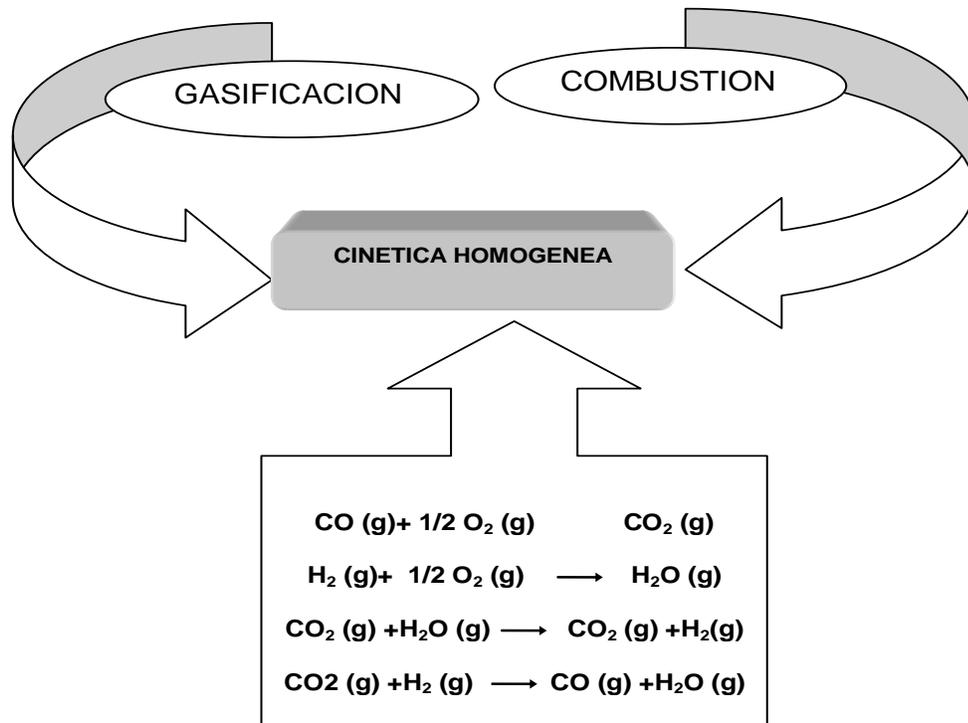


Fig.1.4.- Reacciones homogéneas

ANEXO No.4.

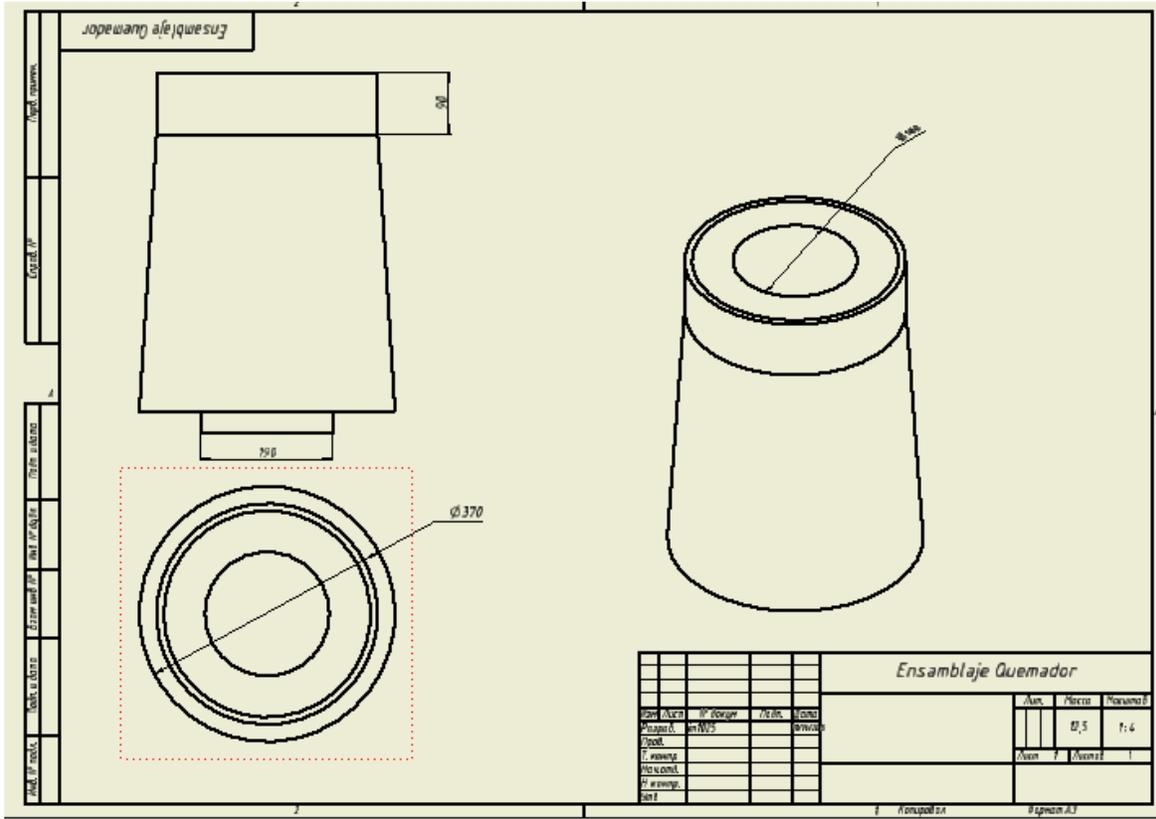


Fig.1.5.- Gasificador.

ANEXO No.5.

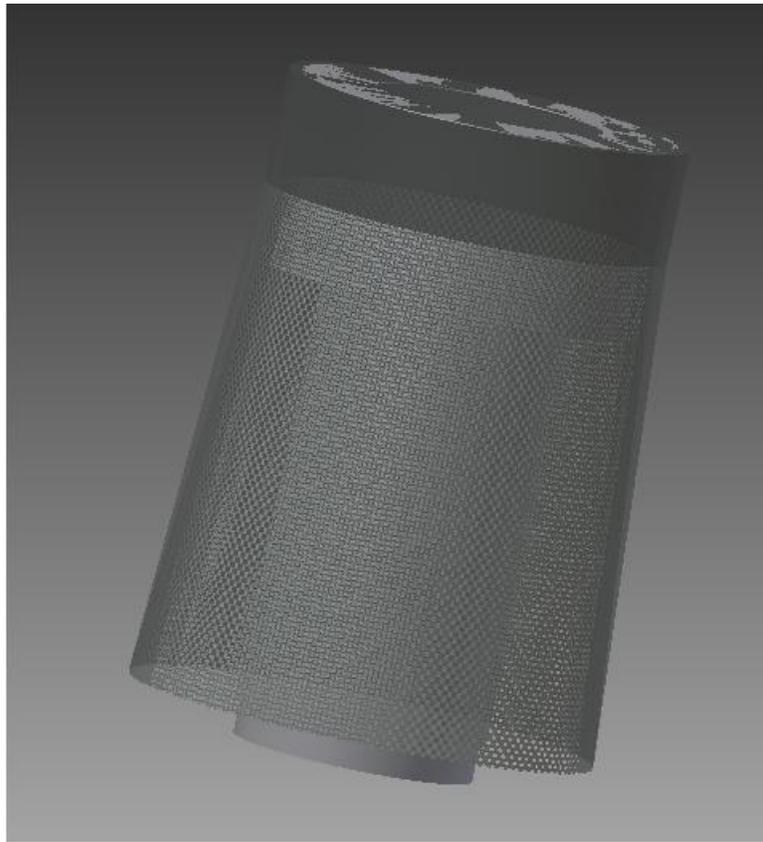


Fig. 1.6.- Gasificador.

ANEXO No.6

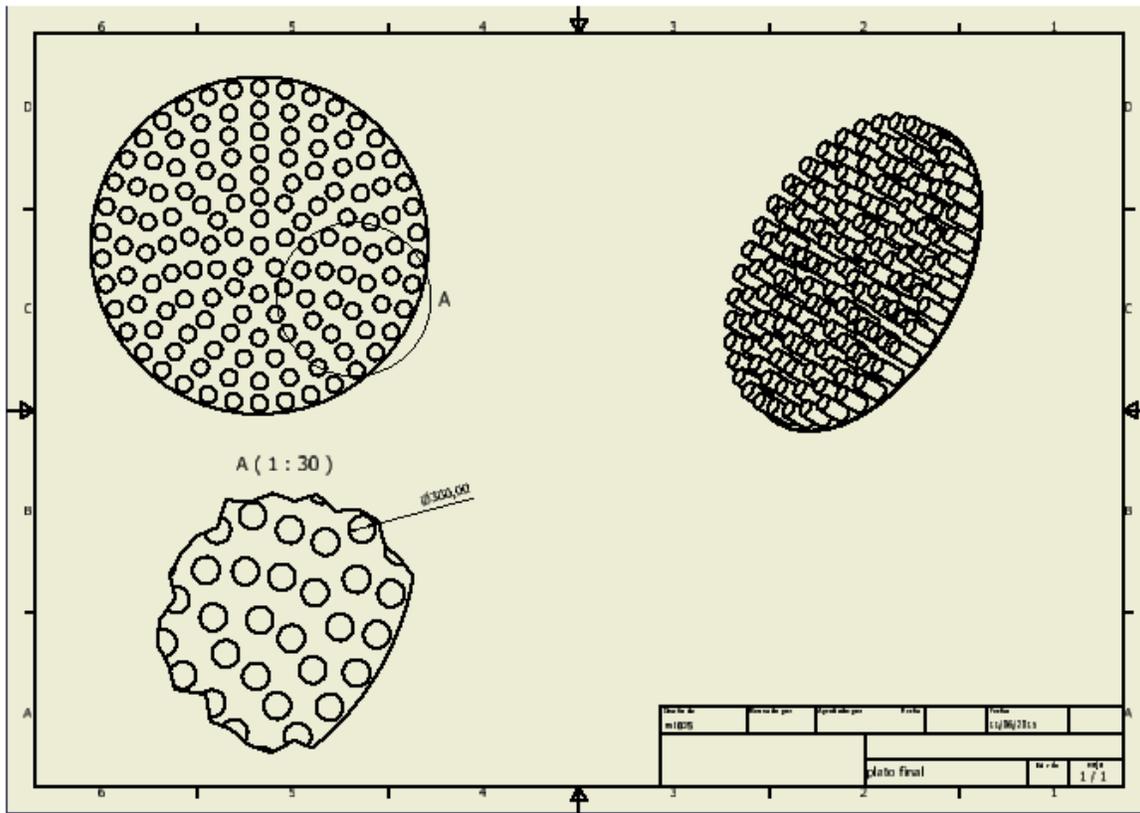


Fig.1.7.- Base de los gasificadores.

ESQUEMA DEL DISEÑO DE UN HORNO GASIFICADOR

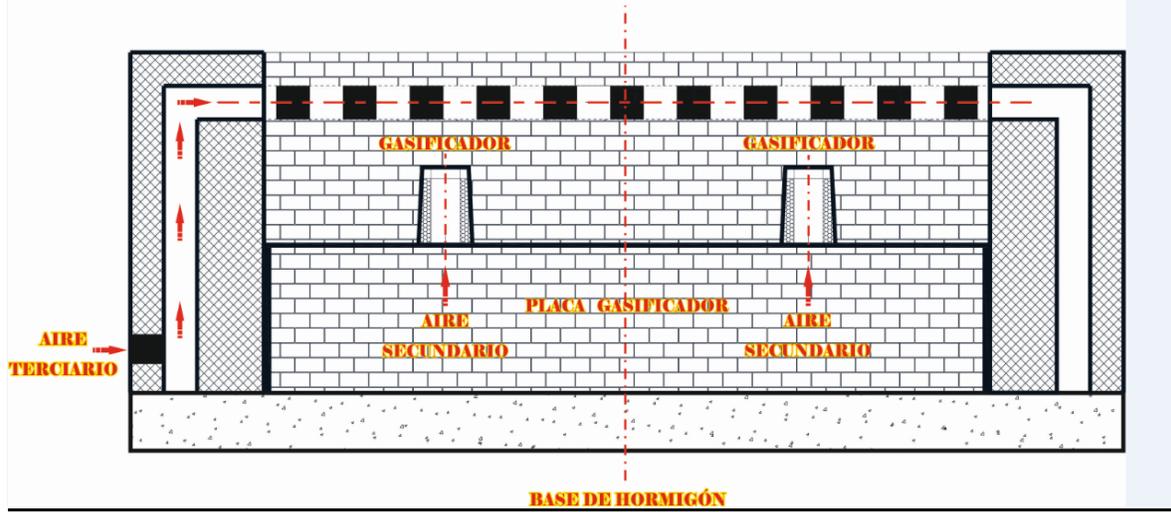


Fig.1.8.-Esquema del horno gasificador.