

REPÚBLICA DE CUBA.
MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR.
UNIVERSIDAD DE CIENFUEGOS.
FACULTAD DE INGENIERÍA



UNIVERSIDAD
DE CIENFUEGOS
CARLOS RAFAEL RODRÍGUEZ



MECÁNICA

Trabajo de Diploma

Título: *Modificación y evaluación térmica del prototipo de hornilla eficiente con el principio de la multitubularidad, para la combustión de biomasa.*

Autor: *Alixbiades Morales García.*

Tutor: *Dr. Pedro Fundora Beltrán*

Cienfuegos 2019

**DECLARACION DE AUTORIDAD
UNIVERSIDAD DE CIENFUEGOS**



UNIVERSIDAD
CIENFUEGOS
Carlos Rafael Rodríguez

“Carlos Rafael Rodríguez”

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 esta 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:

“Todo nuestro pueblo, todos los trabajadores, todos nuestros jóvenes, incluso nuestros pioneros tienen que tomar conciencia de la energía, de sus perspectivas futuras...”

Fidel

Dedicatoria:

Han sido muchos los que han tenido que ver con la terminación de esta tesis, por ello quiero agradecer a:

-  *mis padres por seguir siempre mis pasos;*
-  *mi hermano por servirme de ejemplo y guía;*
-  *mi esposa e hijo;*
-  *todos mis profesores, no solo por instruirme, sino además, por educarme.*

Agradecimiento:

Agradezco a la Revolución Cubana, que con su líder histórico al frente, creó las condiciones necesarias para que el hijo de una humilde familia llegara a ser ingeniero; además al tutor Dr. Pedro Fundora Beltrán por su valiosa ayuda prestada, sin la que no hubiera sido posible graduarme.

Resumen:

El presente trabajo se basa en la modificación y evaluación térmica de una hornilla eficiente, utilizando el principio de la multitubularidad. Inicialmente se hace una valoración de las tecnologías de combustión más utilizadas y que la literatura consultada expone, así como los combustibles sólidos (biomasas) empleados en las mismas. Las respuestas favorables de la combustión de diferentes combustibles sólidos, en las tecnologías analizadas, reafirma el criterio de la multitubularidad como una condición indispensable para la gasificación - combustión de los combustibles sólidos, aun cuando en ninguno de los casos, se haga referencia a este particular. Constituye esto una fortaleza importante para perfeccionar la tecnología. La evaluación precedente junto con otros trabajos de investigación realizados con anterioridad, permitirán modificar y evaluar tecnologías de biomasas, con el principio de la multitubularidad natural o provocada, en la combustión de lecho fijo de capa gruesa, asegurando que la hornilla eficiente, se base en el 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 realizaron modificaciones en la cámara de combustión, para facilitar el flujo de aire secundario a la hornilla, así como en la cámara exterior, la cual se aisló térmicamente y en su parte superior se dispuso un difusor para crear turbulencia en el interior de la cámara de combustión, se aumentó las facilidades de evacuación de los gases. La evaluación se dirigió a la determinación de la potencia térmica de la hornilla, la eficiencia del sistema térmico y la transferencia de calor transversal, a través del aislamiento, en las diferentes formaciones de la hornilla, con diferentes combustibles biomásicos y con diferentes niveles de multitubularidad.

Palabras claves:

Fogón, multitubularidad, combustión, combustibles, biomásas, modificación evaluación.

Summary:

The present work is based on the modification and thermal evaluation of an efficient burner, using the principle of the multitubularidad. Initially a valuation of the used combustion technologies is made and that the consulted literature exposes, as well as the solid fuels (biomasses) employees in the same ones. The favorable answers of the combustion of different solid fuels, in the analyzed technologies, it reaffirms the approach of the multitubularidad like an indispensable condition for the gasification -combustion of the solid fuels, even when in none of the cases, reference is made to this matter. It constitutes this an important strength to perfect the technology. The precedent evaluation together with other investigation works carried out previously, they will allow to modify and to evaluate technologies of biomasses, with the principle of the natural or provoked multitubularidad, in the combustion of fixed channel of thick layer, assuring that the efficient burner, is based on the mathematical physical pattern of behavior of the loss of mass in the time, of the tubular briquettes and multitubulares in combustion, outside of a camera with registration of the mass for unit of time. They were carried out modifications in the combustion camera, to facilitate the flow of secondary air to the burner, as well as in the external camera, which was isolated thermally and in their superior part he/she prepared a difusor to create turbulence inside the combustion camera, you increased the facilities of evacuation of the gases. The evaluation went to the determination of the thermal power of the burner, the efficiency of the thermal system and the transfer of traverse heat, through the isolation, in the different formations of the burner, with different combustible biomásicos and with different multitubularidad levels.

Key words:

Vent, multitubularidad, combustion, fuels, biomasses, modification evaluation.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
1.1 - RESEÑA HISTÓRICA DE LOS COMBUSTIBLES SÓLIDOS	3
1.2: LA BIOMASA COMO FUENTE DE ENERGÍA.	4
1.2.1: Clasificación de los recursos de bioenergía.	5
1.2.2.-Utilización de la biomasa.	7
1.3. PROCESOS DE CONVERSIÓN DE LA BIOMASA EN ENERGÍA	9
1.3.1. Métodos Termoquímicos	9
1.3.2. Métodos Biológicos	10
1.3.3. Aplicaciones.	11
1.4: PROCESO DE COMBUSTIÓN DE LOS COMBUSTIBLES SÓLIDOS.	13
1.5: VARIANTES DE DISEÑO DE HORNILLAS Y SUS CARACTERÍSTICAS.	15
1.5.1 Hornilla Navivoti Chulha.	15
1.5.2 Hornilla mejorada para la calefacción y cocción de alimentos, de procedencia Paquistaní.	16
1.5.3 Hornilla Institucional USIKA.	16
1.5.4 Hornilla Justa.	17
1.6 CARACTERIZACION DE LOS COMBUSTIBLES SOLIDOS PARA SU EMPLEO EN EL PROTOTIPO DE HORNILLA EFICIENTE.	18
1.6.1 La leña como combustible.	18
1.6.2 Las briquetas combustibles.	19
1.6.3 Biomosas sin densificar (a granel).	19
1.7 GASIFICACIÓN.	20
1.7.1 Diferencia entre gasificación y combustión.	21
1.7.2 Gasificador.	21
1.7.3 Proceso de gasificación.	22
1.7.4 Termoquímica del proceso de gasificación.	22
1.7.5 Tipos de gasificadores.	24
1.8 FOGONES EFICIENTES.	25
1.8.1 Fogón de leña modelo " Doña Justa".	26
1.8.2 Fogón para leña J.P.V.C.	27
1.8.3 Fogón recuperativo para biomosas P.F.B.A.	27

1.8.4 Principio de funcionamiento del Fogón- Gasificador.	28
Conclusiones parciales Capítulo I:	31
Capítulo II. Modificación de hornilla eficiente	32
2.1 Caracterización de la hornilla precedente para la combustión de Biomosas. ..	32
2.1.1 Introducción.....	32
2.1.2 Caracterización de la hornilla precedente.	32
2.2 Modificación de la hornilla precedente para la garantía del proceso de gasificación combustión. (Formación 1)	40
2.2.1 Introducción.....	40
2.2.2 Presentación de la hornilla precedente y la modificada.	40
2.3.1 Introducción.....	44
Conclusiones Parciales del Capítulo 2.	49
Capitulo III. Evaluación Térmica el Prototipo de Hornilla Eficiente, para la combustión de Biomosas.	50
3.1 Evaluación de la hornilla Eficiente modificada para la combustión de Biomosas.	50
3.1.1 Introducción.....	50
3.1.2 Metodología para la evaluación de la hornilla eficiente con el principio de la multitubularidad, para combustible de biomasa.	51
3.1.2.1 Determinación de la potencia térmica y la energía del proceso de gasificación de la hornilla (Método teórico experimental).....	52
3.1.2.2 Determinación real de la potencia térmica y la energía de la hornilla evaluada, en las diferentes formaciones.	53
3.1.2.3 Determinación de la eficiencia del sistema térmico (η_{sc}) (Fundora, 2009)	54
3.3.2.4 Ejemplo de cálculo. (Formación 1)	55
3.3.2.5 Ejemplo de cálculo. (Formación 2)	61
3.3.3 Valoración medio ambiental del uso de la hornilla.	67
Conclusiones parciales del Capitulo3.....	69
Conclusiones Generales.	70
Recomendaciones.....	71
Bibliografía:	81
Anexos.	84

INTRODUCCIÓN

En los últimos años del siglo XX la humanidad tomó conciencia del rápido agotamiento de los combustibles fósiles, de los peligros de la contaminación ambiental (cambios climáticos), de la necesidad de mejorar todos los procesos de conversión energética (ahorro energético) y potenciar el uso de las energías renovables como recursos energéticos a largo plazo.

Se plantea entonces por primera vez el concepto de desarrollo sostenible y en particular a lo que a energía se refiere, y fue en 1987 cuando La Comisión Mundial de Medio Ambiente y Desarrollo, definió el desarrollo sostenible como aquel que satisfaga las necesidades del presente, sin limitar las posibilidades de las generaciones futuras para satisfacer las suyas.

Se entiende como biomasa toda aquella materia orgánica que procede directa o indirectamente de la energía solar, fijada en la tierra mediante el proceso de fotosíntesis. De hecho, la biomasa ha sido la base del suministro energético en épocas pasadas y aún lo sigue siendo en países subdesarrollados. En la actualidad se vuelve a la biomasa buscando soluciones energéticas eficientes que permitan nuevas concepciones económicas de su aprovechamiento para obtener una serie de beneficios, entre los que se encuentra la reducción de emisiones contaminantes a la atmósfera, fundamentalmente de CO₂, causante del efecto invernadero (el CO₂ de la biomasa es neutro), SO₂, causante de la lluvia ácida, y otros contaminantes.

Como aproximación puede decirse que la biomasa sólida se puede destinar a aplicaciones térmicas más o menos convencionales, la biomasa en forma líquida se destinaría a su utilización en motores de vehículos y los derivados gaseosos de la biomasa a la producción de electricidad en sistemas de cogeneración.

Las aplicaciones domésticas e industriales que pueden considerarse tradicionales o habituales, son las que funcionan mediante la combustión directa de la biomasa. En este caso es factible la introducción de avances tecnológicos y la incorporación de elementos técnicos que faciliten el uso de la biomasa en estos ámbitos. En otro grupo podrían incluirse aplicaciones más recientes, entre las nuevas tecnologías

disponibles puede citarse como fórmula más destacable la gasificación de la biomasa.

Los estudios basados en la Multitubularidad para la combustión en pila de la biomasa sin densificar, posibilitan un análisis integral de la situación y la consiguiente propuesta de mejores prácticas de manejo de la misma. Este tipo de estudio por su carácter integrador y las amplias posibilidades que brinda para lograr altos índices de eficiencia, se vislumbra como el instrumento por excelencia de la gestión energética y ambiental del siglo XXI.

Problema científico:

La carencia de aislamiento térmico de la hornilla precedente, para funcionar con el principio de la Multitubularidad, no asegura con efectividad el proceso de gasificación y combustión de la biomasa.

Hipótesis:

Con la modificación y evaluación de la hornilla eficiente, al colocar en la superficie exterior aislamiento térmico y difusores para crear turbulencia en el aire secundario se podrá garantizar de forma efectiva el proceso de gasificación y combustión de la biomasa.

Objetivos Generales:

Modificar y evaluar térmicamente la hornilla eficiente, utilizando el principio de la multitubularidad, para la combustión de biomasa.

Objetivos Específicos:

- 1) Revisión y resumen bibliográfico referente a las biomasa y a sus potencialidades como combustibles y los diferentes diseños de Fogones para cocción de alimento en general, buscando los elementos de semejanza o diferencias.
- 2) Modificarla hornilla eficiente, con principio de la multitubularidad.
- 3) Evaluar la hornilla eficiente, con el principio de la multitubularidad.
- 4) Determinar el impacto Ambiental de la utilización de esta tecnología.

CAPÍTULO I:

FUNDAMENTO DEL PROCESO DE COMBUSTIÓN Y GASIFICACIÓN DE LOS COMBUSTIBLES SÓLIDOS Y LAS TECNOLOGÍAS AFINES

1.1 - RESEÑA HISTÓRICA DE LOS COMBUSTIBLES SÓLIDOS

En los años 1870 y a principios de los años 1880, los fuegos abiertos solían definirse como esencialmente ineficientes. Los investigadores al analizar el fuego lograron desarrollar hornillas realmente mejoradas. El Dr. Grant Ballard-Tremeer y el Dr. Kirk Smith fueron los primeros científicos en descubrir que la llama de tres piedras podía ser más eficiente y más limpio en combustión que algunos hornos “mejorados”. Teniendo en mente que las tecnologías indígenas se han desarrollado sobre incontables años de experimentación, son de gran valor y ha cambiado la perspectiva de los científicos que lidian contra las causas del sufrimiento humano. Observar las formas en que los expertos realizan este proceso ha enseñado a los ingenieros a diseñar tecnologías más avanzadas y modernas para cocinar, se han diseñado primariamente para lograr una combustión más limpia forzando el calor contra la olla sin aumentar las emisiones nocivas. Un fuego puede arder y ser limpio cuando cocineros expertos meten la leña poco a poco en el fuego midiendo el combustible. Esta ignición puede ser ardiente y útil cuando hay que preparar la comida o la bebida rápidamente. El calor pasa a quemar la madera sin producir mucho humo, ya que los gases de la combustión de la llama producida queman el humo mientras sale de la madera. En el laboratorio las hornillas modernas ganan más puntos que cualquier fuego abierto, aunque estos se realicen bien. Una buena hornilla ofrece otros beneficios además de ahorrar leña o reducir el humo, es la manera en que cocina la comida, es típicamente la calidad más apreciada por los que la usan. Es posible que con estos hornos mejorados sea más fácil, seguro y rápido cocinar con leña, además de contribuir a la belleza de la cocina, es más fácil de prender, requiere poco mantenimiento mientras quema y satisface las necesidades de la cocinera. (Meneses Subarnaba - Yulien, 2008).

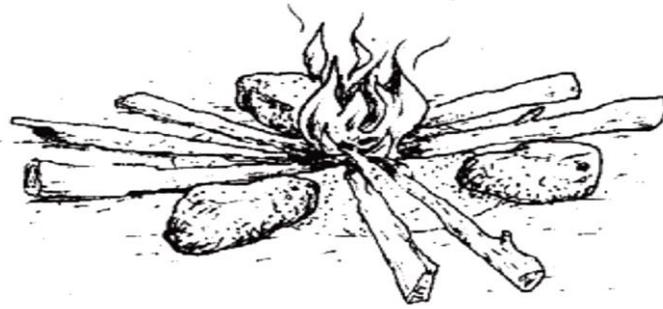


Fig.1.1 Fuego abierto tradicional.

Fuente: Elaboración Propia.

1.2: LA BIOMASA COMO FUENTE DE ENERGÍA.

¿Qué es la Biomasa?

Debe mencionarse que prácticamente toda la materia viva que hay sobre la Tierra tiene su origen en la transformación de ciertas sustancias inorgánicas en orgánicas, proceso que se efectúa gracias a la llamada función clorofiliana por parte de las plantas a partir de la energía solar. A través de la cadena alimentaria de los distintos seres vivos, incluidos los microorganismos, casi toda la biosfera se nutre de esa captación original de energía.

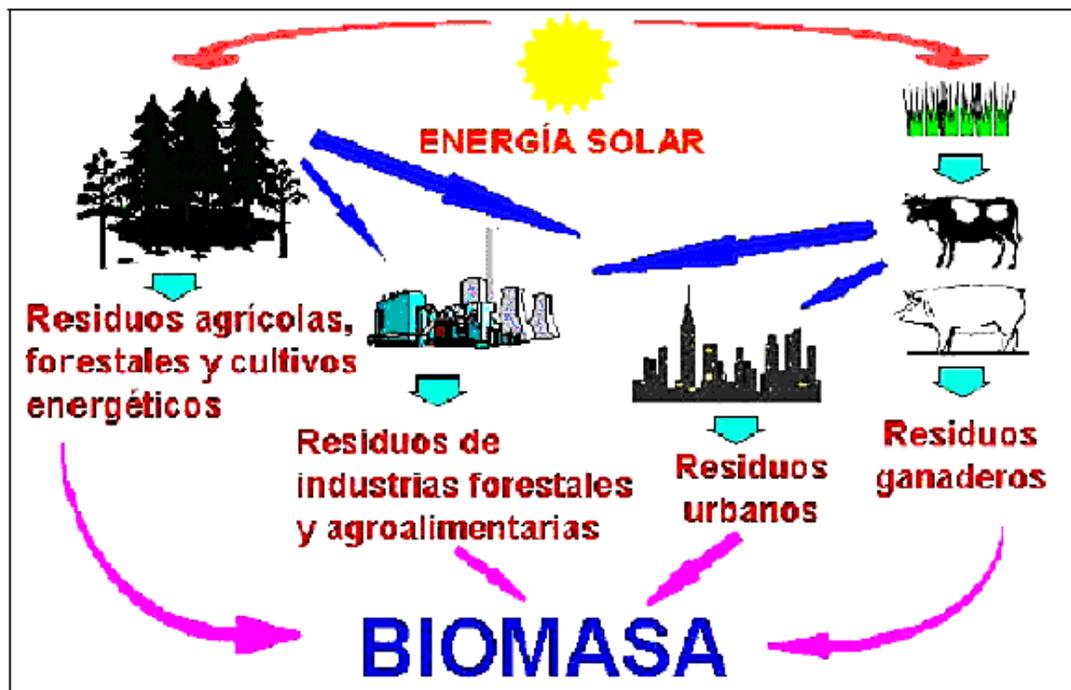


Fig.1.2 Ciclo energético.

Fuente: Elaboración Propia.

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 la 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 autosuficientes en un alto grado, a partir del uso racional de los residuos y administrando inteligentemente la biomasa disponible en la localidad.

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. Este 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. Dávila González. (Oriol, 2011).

1.2.1: Clasificación de los recursos de bioenergía.

Los recursos de bioenergía pueden ser clasificados en tres categorías:

- 1) Residuos y basuras.

Las producciones globales de residuos de la biomasa, incluso los derivados de alimentos, fibras, y producción de bosques, exceden 110 EJ/año (1 EJ=10¹⁸ joule), donde casi el 10 % de los cuales es usado para energía. Los residuos que se

concentran en los sitios industriales son actualmente la fuente más grande de la biomasa usada comercialmente. Por ejemplo, el bagazo, mantiene energía procesando el jugo para azúcar o alcohol. Algunos residuos no pueden usarse para energía, en algunos casos los costos de transporte y recolección son prohibitivos; otros dictados de consideraciones agronómicas plantean que los residuos sean reciclados a la tierra. También influye la competencia en los usos no energéticos para los residuos (como producción de forraje, el suministro material, industrial, etc.). Considerando tales factores, el escenario de energía de biomasa intensiva del IPCC (Panel Intergubernamental de Cambio de Clima) incluye una contribución de 55 EJ/año de los residuos de biomasa al suministro de la energía comercial global total para el 2050.

Los residuos son una fuente especialmente importante de energía de biomasa en regiones densamente pobladas, donde mucha tierra es usada para producir alimentos. De hecho, los residuos de biomasa pueden jugar roles importantes en tales regiones, precisamente porque producen muchos alimentos y las cosechas pueden generar residuos de subproductos.

El estiércol animal es otro derivado agrícola que puede usarse en digestores anaerobios para producir biogás. La disponibilidad de este recurso depende de la condición del ganado que lo produce y cuánto estiércol del animal es realmente reunido. En algunos casos, los estimados de disponibilidad de estiércol usado para planeamiento de proyectos han estado lejanos de la disponibilidad real, lo cual ha llevado a fracasos.

2) Crecimiento de cosechas de energía.

Las cosechas crecientes tienen un potencial significativo específicamente para energía. Pueden producirse cosechas de energía de dos maneras:

1. Dedicando un área exclusivamente a la producción (plantaciones de energía).
2. Mezclando la producción de cosechas de energía y no energéticos.
- 3) Vegetación natural.

La vegetación natural podría ser un recurso sostenible en algunas situaciones, pero no se ha usado sosteniblemente a gran escala. Por ejemplo, en muchos países, la tala de bosques naturales primarios (para energía, tierra para agricultura y otros usos) ha llevado a aumentar la erosión, pérdida del hábitat natural, emisiones de dióxido de carbono (CO₂) a la atmósfera, y otros impactos negativos. Aunque habrá situaciones en las que puede usarse vegetación natural apropiadamente para energía, las pautas generales son difíciles de ofrecer para tales situaciones. (Dávila González - Oriel ,2011)

1.2.2.-Utilización de la biomasa.

- 1) 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.

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.

- 2) 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.

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.

3) 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 sobrefertilización de los suelos y la contaminación de las cuencas hidrográficas.

4) 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.

5) 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. Dávila González, Oriel (2011)

1.3. PROCESOS DE CONVERSIÓN DE LA BIOMASA EN ENERGÍA

Existen diferentes métodos que transforman la biomasa en energía aprovechable, siendo los dos métodos más utilizados en este momento, los termoquímicos y los biológicos.

1.3.1. Métodos Termoquímicos

Estos métodos se basan en la utilización del calor como fuente de transformación de la biomasa. Están muy desarrollados para la biomasa seca, sobre todo para la paja y la madera. Se utilizan los procesos de:

- **Combustión**

Es la oxidación de la biomasa por el oxígeno del aire; en esta reacción se libera agua y gas carbónico, y puede ser utilizado para la calefacción doméstica y para la producción de calor industrial.

- **Pirolisis**

Se trata de una combustión incompleta a alta temperatura (500°C) de la biomasa en condiciones anaerobias. Se utiliza desde hace mucho tiempo

para producir carbón vegetal. Este método libera también un gas pobre, mezcla de monóxido (CO) y dióxido de carbono (CO₂), de hidrógeno (H₂) y de hidrocarburos ligeros. Este gas, de poco poder calórico, puede servir para accionar motores diésel, para producir electricidad, o para mover vehículos. Una variante de la pirolisis, es la pirolisis flash. Esta se realiza a una temperatura mayor, alrededor de 1.000 °C, y tiene la ventaja de asegurar una gasificación casi total de la biomasa. Se optimiza de esta forma el "gas pobre". Las instalaciones en la que se realizan la pirolisis y la gasificación de la biomasa se llaman gasógenos. El gas pobre producido puede utilizarse directamente o puede servir como base para la síntesis de metanol, el cual podría sustituir a las gasolinas para la alimentación de los motores de explosión (carburol).

La gasificación tiene ventajas con respecto a la biomasa original:

1. el gas producido es más versátil y se puede usar para los mismos propósitos que el gas natural;
2. puede quemarse para producir calor y vapor y puede alimentar motores de combustión interna y turbinas de gas para generar electricidad;
3. produce un combustible relativamente libre de impurezas y causa menores problemas de contaminación al quemarse. (Mencía Hourruitiner - Víctor, 2011).

1.3.2. Métodos Biológicos

Se trata de una fermentación alcohólica que transforma la biomasa en etanol (biocombustible). Este alcohol se produce por la fermentación de azúcares

Otro método biológico es la fermentación metánica, que es la digestión anaeróbica de la biomasa por bacterias. Se suele utilizar para la transformación de la biomasa húmeda. En los fermentadores, o digestores. la celulosa es la sustancia que se degrada en un gas, el cual contiene alrededor de 60% de metano y 40% de gas carbónico. Para este proceso se requiere una temperatura entre 30-35 ° C. Estos

digestores por su gran autonomía presentan una opción favorable para las explotaciones de ganadería intensiva. (Mencía Hourruitiner - Víctor, 2011).

1.3.3. Aplicaciones.

La gran variedad de biomasa 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 se destacan la producción de energía térmica, electricidad, (Mencía Hourruitiner - V, 2011).

1. 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.

2. 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, 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 diésel 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.

3. 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.

4. 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 diésel 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.

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

- 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. (Mencía Hourruitiner - V, 2011).

1.4: 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:

- 1 - Preparación del combustible en cuanto a su estado físico y su temperatura.
- 2 - Selección adecuada del tipo de quemador.
- 3 - Proporción entre la cantidad de aire y la cantidad de combustible para que exista oxígeno suficiente sin que exista defecto o exceso de aire.
- 4 - 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:

- 1 - Tener elevado poder calórico.
- 2 - No ser materia prima de ninguna industria.
- 3 - Que exista en cantidades abundantes.
- 4 - Que no sea tóxico, ni contaminante.
- 5 - 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).

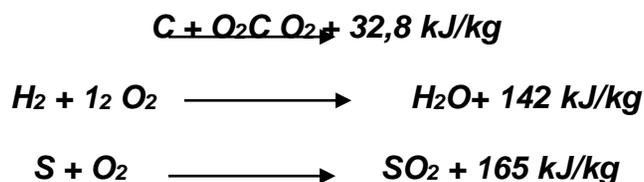
Artificiales: Gasolina, queroseno, gas oíl, fuel oíl.

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 con 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:

- 1 – Calentamiento.
- 2 – Revalorización de humedad (secado).
- 3 – Liberación de sustancias volátiles y su combustión.
- 4 – Combustión del coque.

1.5: VARIANTES DE DISEÑO DE HORNILLAS Y SUS CARACTERÍSTICAS.

1.5.1 Hornilla Navivoti Chulha.

Tiene gran difusión en la India, utiliza combustibles diversos, pero de pequeña granulometría como, aserrín de madera, cáscara de arroz, etc. Se construyen de chapas o tubos de aceros de construcción o de cerámica, como se puede observar en la figura; el aire que se alimenta por el conducto central está en contacto directo con el combustible sólido, produciendo un efecto de chimenea y una transformación en gases combustibles (Gasificación), los costos son relativamente bajos y para una hornilla de 2 kW de potencia térmica se estima un costo de 3 USD. La eficiencia de la tecnología alcanza el 34%.

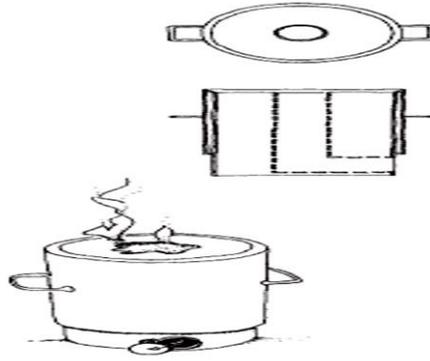


Fig.1.3 Hornilla Navivoti Chulha.

Fuente: Elaboración Propia.

1.5.2 Hornilla mejorada para la calefacción y cocción de alimentos, de procedencia Paquistaní.

Utiliza en su construcción, chatarras de metales ferrosos y chapas nuevas; como combustibles, la madera, el estiércol, malezas de bosques etc. Su costo para las de pequeña potencia es de 10 USD, y las de mayor potencia pueden alcanzar los 20 USD. La eficiencia térmica puede alcanzar el 43%. El funcionamiento se basa en aprovechar todas las manifestaciones del calor de la combustión, al colocar la olla cerrada junto con el combustible, con la cámara de la hornilla cerrada y dejando escapar los gases quemados por una corta chimenea en la parte superior.

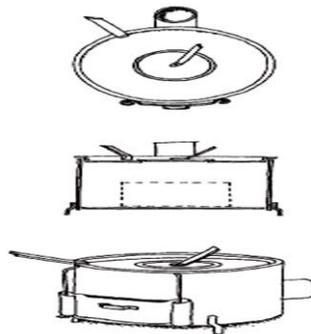


Fig.1.4 Hornilla Mejorada Paquistaní.

Fuente: Elaboración Propia.

1.5.3 Hornilla Institucional USIKA.

Es una hornilla de gran demanda por el ahorro de combustible y por la eficiencia que alcanza (Cerca del 40%), utiliza leña como combustible, pero puede usar

briquetas de biomasa, se construye de chapas de acero o galvanizadas con recubrimientos de cerámica como aislantes interiormente. La olla cierra la cámara de combustión a la vez que está dentro de ella; los gases de la combustión se extraen por la chimenea.

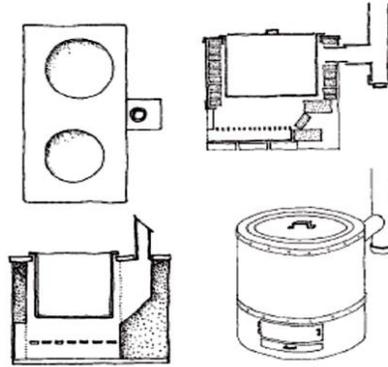


Fig.1.5 Hornilla Institucional USIKA.

Fuente: Elaboración Propia.

1.5.4 Hornilla Justa.

El armazón de una hornilla Justa puede ser construido con una variedad de diferentes materiales, tales como cemento, barro y arena, ladrillo, adobe o metal, etc. Este tipo de tecnología es propia de países de Sur América, son tecnologías de carácter prismáticas con alimentación axial del combustible y de aire primario, ya que para el aire secundario se dispone de toberas distribuidas en las proximidades de la plancha para las ollas. La eficiencia térmica suele estar en un rango entre (12 -22) % sin embargo, la posibilidad de utilizar varias ollas simultáneamente y de disponer de diferentes zonas de aprovechamiento térmico, permite un mejor aprovechamiento de las potencialidades energéticas.

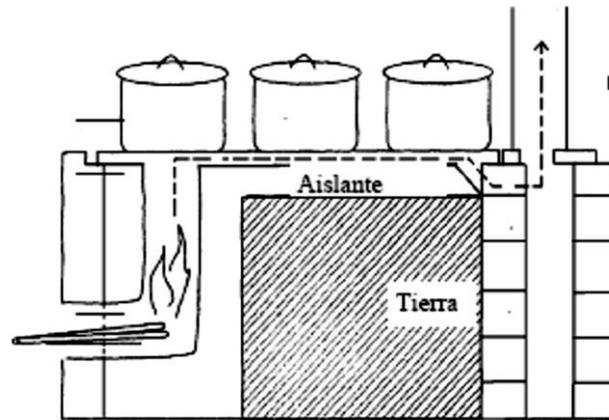


Fig.1.6 Hornilla Justa.

Fuente: Elaboración Propia.

1.6 CARACTERIZACION DE LOS COMBUSTIBLES SOLIDOS PARA SU EMPLEO EN EL PROTOTIPO DE HORNILLA EFICIENTE.

Para que un sistema térmico resulte eficiente es vital la preparación con calidad del combustible, ya que de todos los factores involucrados, este constituye el esencial. Una tecnología de combustión puede resultar térmicamente ineficiente (Por sus pérdidas de calor, geometría inapropiada, etc.), Sin embargo, si la preparación y organización del combustible en la cámara de combustión es adecuada, la tecnología puede funcionar aceptablemente y satisfacer los requisitos de la aplicación.

1.6.1 La leña como combustible.

Cuando el combustible disponible para la combustión es la leña esta debe ser fragmentada en trozos inferiores a 180mm de longitud y diámetros hasta 100mm. La humedad requerida inicialmente debe ser inferior al 20%. Su colocación en la parrilla preferiblemente horizontal y en diferentes direcciones (multitubularidad en la pila de leña).

Cuando la parrilla utilizada dispone de los gasificadores la ubicación de la leña conviene hacerla de forma vertical y alrededor de los últimos, formando de esta manera un conjunto independiente de briquetas tubulares, que sumadas constituyen una gran briqueta multitubular como el caso precedente (Por un problema de espacio), no obstante cualquier orientación puede ser utilizada sin

afectación significativa de la eficiencia de la combustión, recuérdese que el empleo de esta alternativa de parrilla favorece el incremento del aire secundario (Al conducto para aire secundario se suman los gasificadores) a la porción superior de la cámara de combustión para la combustión completa de los gases generados en el proceso de gasificación.

El aseguramiento de la continuidad de la combustión, es posible gracias al suministro periódico de pequeñas cantidades de combustible (Leña), cuando se requiera. Estos suministros suplementarios de combustible resultan menos exigentes desde el punto de vista de la humedad que en los inicios del proceso de combustión, pudiéndose utilizar hasta leña verde. El funcionamiento de la hornilla puede regularse, estrangulando el suministro de aire de alimentación o por la chimenea o simultáneamente por ambas vías, según las necesidades energéticas de la aplicación. (Encía Hourruitiner - Víctor, 2011).

1.6.2 Las briquetas combustibles.

Las briquetas macizas de biomasa presentan semejantes requisitos en su empleo como combustibles, que la leña., sin embargo, las briquetas tubulares y multitubulares, que independientemente de la parrilla utilizada, forman multitubularidad física real, con más conductos de menor diámetro, en el caso de las briquetas multitubulares propiamente dichas y con un menor número de conductos de mayor diámetro en el caso de las briquetas tubulares, sin que ello influya en los índices de combustión, al hacer una comparación entre las mismas. Las biomasa que conforman las briquetas precedentes, pueden ser disímiles, aunque se distinguen dos grupos principales.

- a) Briquetas de biomasa leñosas (aserrín de madera)
- b) Briquetas de biomasa no leñosas (hojas de árboles, cáscara de arroz, paja de cereales etc.). (Mencía Hourruitiner - Víctor, 2011).

1.6.3 Biomasa sin densificar (a granel).

El comportamiento energético de las briquetas en la simulación experimental anterior, deja como interrogante ¿pueden funcionar con aceptables niveles de eficiencia, las biomasa sin densificar con densidades inferiores a 500 Kg/m³,

fuera del rango experimentado? La respuesta es afirmativa, siempre que se emplee la parrilla con los gasificadores múltiples y la biomasa se sitúe convenientemente alrededor de los mismos en los espacios disponibles y se logre formar una gran briqueta multitubular. Los resultados, con las alternativas precedentes demostraron que la garantía del proceso de transformación (gasificación) solo es posible si se asegura una adecuada multitubularidad del combustible sólido y para el incremento de la eficiencia de la combustión, una suficiente inyección de aire secundario precalentado y dirigido a la parte superior de la cámara de combustión (parte superior del combustible).

Reportes de la literatura revisada plantean como dificultad para la transformación (gasificación) de las briquetas tubulares, su baja densidad, dado por la posibilidad de combustión en el conducto de las mismas, por la presencia de oxígeno en las oquedades de la superficie interior del conducto y a la infiltración de aire entre los espacios de la masa de biomasa que la forman, por su baja densidad. La solución de esta dificultad convierte a la tecnología de combustión en multipropósito, posibilitando el aprovechamiento de las biomásas disponibles independientemente de su estado. Precisamente la investigación que se desarrolla en este trabajo centra su atención fundamental en esta alternativa, sin despreciar las restantes.

1.7 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.

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

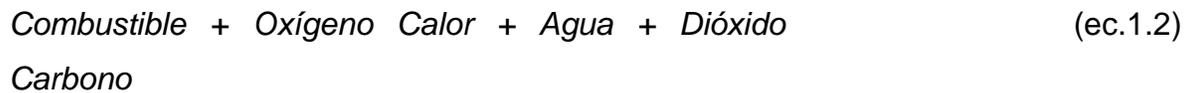
1. La materia prima (hidrocarburo) es introducida al reactor químico (gasificador), el cual se encuentra a alta presión y alta temperatura, conteniendo vapor y una limitada cantidad de oxígeno.
2. Bajo estas condiciones de reducción, los enlaces químicos del hidrocarburo son rotos debido a la alta presión 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.

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

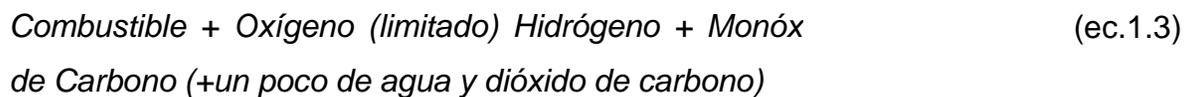
1.7.1 Diferencia entre gasificación y combustión.

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 que 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:



1.7.2 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 Dávila, O, (2011).

1.7.3 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, la 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.

1.7.4 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 Dávila - O, 2011).

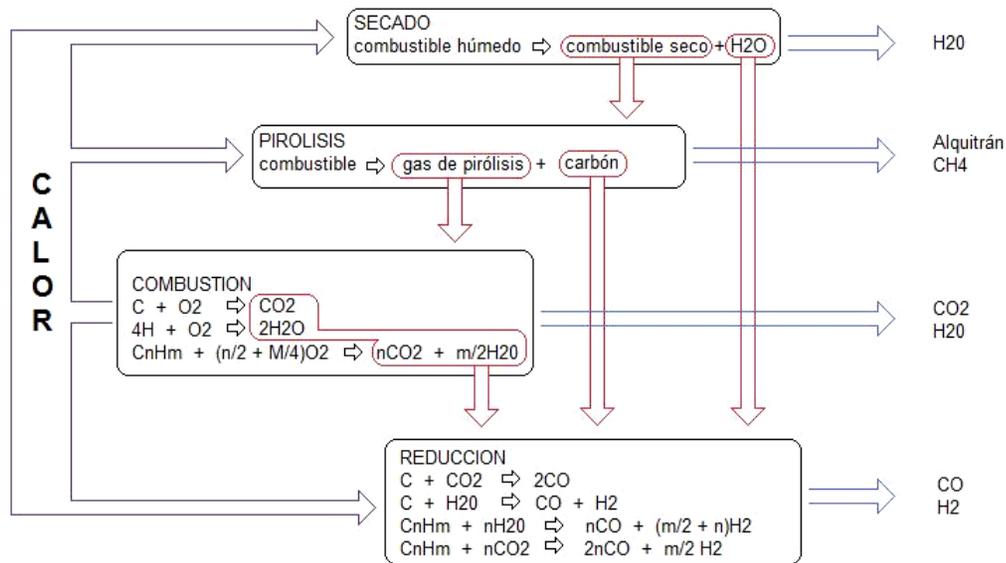


Figura 1.6 Etapas de la gasificación.

Fuente: Elaboración Propia.

1.7.5 Tipos de gasificadores.

Los gasificadores se pueden agrupar, según el manejo del combustible, en tres

grupos fundamentales:

De cama fija: En donde el combustible permanece estático dentro del gasificador, y el frente de pirolisis 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 encuentran en suspensión.

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 Dávila - Oriel, 2011).

	1) De cama fija		2) De cama fluidizada		3) Flujo arrastrado
	corriente paralela	contra corriente	densa	circulante	
T°C	700-1200	700-900	<900	<900	1500
Breas	baja	muy alta	intermedia	intermedia	ausente
Control	fácil	muy fácil	intermedio	intermedio	muy complejo
Potencia	<5MW	<20MW	10<MW<100	>20 MW	>100 MW
Combustible	muy crítico	crítico	poco crítico	poco crítico	particulas muy finas

Figura 1.7 Cuadro comparativo entre los distintos tipos de gasificadores.

Fuentes: Elaboración Propia.

1.8 FOGONES EFICIENTES.

Eficiencia de los fogones.

La eficiencia de los fogones está determinada por el nivel de aprovechamiento del calor de combustión en la elaboración o cocción de los alimentos, que se procesen. Por esta razón, es importante tener en cuenta las formas en que se transmite el calor de combustión para el diseño de las diferentes variantes de fogones.

El calor por convección tiene su máximo aprovechamiento cuando toda la llama está en contacto directo con la superficie de la olla o recipiente, para lo cual debe cumplirse la relación entre el diámetro del recipiente que se utilice, la altura o distancia de la parrilla a la olla y el diámetro de dicha parrilla.

El máximo de eficiencia se alcanza cuando se cumplen simultáneamente las dos condiciones siguientes:

1) El diámetro de la olla (D) es el doble del diámetro de la parrilla (d):

$$d = \frac{1}{2}D.$$

2) La distancia de la olla a la parrilla (h) es la mitad del diámetro de la olla. (D):

$$h = \frac{1}{2}D.$$

1.8.1 Fogón de leña modelo " Doña Justa".

Este fogón es la combinación del fogón tipo "Plancha" que promovía Proleña /Hondura, con el fogón "Rocket" que promovía el Instituto Aprovecho de Oregon, EE.UU. La plancha permitía un nivel de emisiones muy bajo mientras el Rocket permitía una combustión más eficiente por el efecto turbo que genera un pequeño tiro de aire caliente exactamente arriba de la cámara de combustión. El fogón " Doña Justa" fue desarrollado en Honduras en el año 1998 por el Instituto Aprovecho, Proleña y con el apoyo de la ONG estadounidense Forest Wats and People. El fogón consiste en un codo de cerámica como cámara de combustión, la parte horizontal del codo es la cámara de combustión, donde se sitúa el combustible, la parte vertical del codo, termina en un espacio hermetizado por una plancha metálica cuadrada de 3mm de espesor y 50cm de codo, al fondo de la misma se localiza una chimenea cuadrada de 10cm de lado y de 2/3 m de altura.

Características del fogón Doña Justa.

1 - Eficiencia inferior al 20 % (cerca de 16 %).

2 - La madera debe ser picada en pequeños trozos por las dimensiones limitadas del fogón, situación apropiada para la utilización de briquetas de biomásas.

3 - Insignificante emisor de humos por la hermeticidad lograda con la plancha y por el efecto chimenea.

4 - Pérdidas por radiación en la plancha plana, aunque existe la posibilidad del uso directo de las mismas en determinada aplicación.

5 - El costo está entre 40 y 50 USD.

1.8.2 Fogón para leña J.P.V.C.

Este fue un fogón diseñado y construido en Cuba a finales de la década del 80 e instalado en escuelas en el campo, comedores obreros y en menor medida en hogares, es un fogón con cámaras prismáticas y conductos de gases, con pendiente a la salida aprovechando el calor de los gases a la salida, consta de un suministro de aire primario y secundario con tableros situados por debajo y por encima de una pantalla fija, también dispone de un horno que utiliza el calor de los gases quemados por el fogón. Esta misión lo hace una tecnología de combustión directa recuperativa, el nivel de eficiencia de esta tecnología con adecuada regulación puede superar el 20 %. La leña debía ser tronzada en trozos de una dimensión longitudinal de hasta 120 mm, para ser empleada en biomásas residuales en forma de briquetas, estas debían ser de pequeñas dimensiones, densas y la carga en el lugar del fogón debe dejar espacio para la combustión de los volátiles que se generen.

1.8.3 Fogón recuperativo para biomásas P.F.B.A.

Este fogón fue diseñado y construido en La Universidad de Cienfuegos en el año 1996. Con características semejantes al J.P.V.C. pero con algunas diferencias importantes. Con la cámara de combustión mayor y dispuesta de forma que las hornillas hendidas lo más cercana posible a la puerta de alimentación con mayor profundidad que la dispuesta en la dirección de la salida de los gases en

combustión; para aprovechar el calor radiante de las paredes laterales y el calor de conducción del fondo, permitiera incrementar la eficiencia con un volumen sobre la parrilla $2/3$ del volumen total y con toberas en la parte superior (aire secundario) con diferentes ángulos para facilitar el mezclado del aire con los volátiles de la biomasa en combustión primaria. Además, una parrilla dinámica para el desprendimiento de las cenizas y por consiguiente, activación de la combustión en briquetas macizas de biomasa residuales, un horno intercalado a la salida de los gases de escape para la recuperación del calor.

Las toberas de alimentación del aire primario y secundario permiten ser regulados conjuntamente con la chimenea para mejorar la eficiencia de la combustión.

Lo más importante de esta tecnología está en la posibilidad de combustionar cualquier tipo de biomasa densificada y no obstante la eficiencia está en el entorno de la tecnología anterior y el costo de fabricación está entre los 50 y 60 USD.

1.8.4 Principio de funcionamiento del Fogón- Gasificador.

Utiliza la particularidad del intercambiador de aire que se genera en un proceso conectivo en presencia de una zona caliente (baja presión). Ello posibilita el suministro de aire para la reacción química que tiene lugar en el proceso de combustión. Ese aire se mueve entre dos superficies concéntricas y de forma ascendente, recibiendo calor a medida que se acerca al foco térmico, si se dispone de una chimenea, este efecto se puede ver reforzado al hacer contacto con el combustible, se oxida (en presencia de combustión) y en su ascenso ocurren reacciones de oxidación y secado en las capas más superiores del combustible. Todo ello permite la formación de gases combustibles sobre el espacio superior al combustible, con concentraciones que pueden oscilar dependiendo de la granulometría del combustible (condiciones de difusión del oxígeno) y del calor en el lugar del fogón (elevadas temperaturas garantizan la pirolisis flash o gasificación, bajas temperaturas dan lugar a la pirolisis clásica). Sin embargo, para la combustión de los gases combustibles que se forman, se

requiere de una entrada adicional de aire secundario por encima del nivel del combustible.

Para ello se utiliza una alternativa:

- ❖ Conducto tubular integrado a la parrilla con orificios axiales y tangenciales en el cuerpo del cilindro, que forma la cámara de combustión.

Las etapas del proceso de combustión son:

- 1 - Evaporización de la humedad.
- 2 - Emisión y combustión de volátiles.
- 3 - Combustión del coque.

El hecho de que la combustión de una partícula de combustible tome cierto tiempo, obliga a que tenga que lograr que esta sea retenida al menos ese tiempo en la zona de condiciones favorables al proceso de combustión, en este caso en la cámara del fogón.

El proceso de combustión de aire secundario tiene diferentes funciones:

- ❖ Suministrar el oxígeno necesario para completar el proceso de combustión, logrando que la mayor parte de CO sea producida por CO₂.
- ❖ Suministrar diferenciadamente el aire de manera que el aire primario a través de la parrilla e incidiendo sobre las llamas, solo sea la fracción total necesaria para evitar el enfriamiento excesivo de esta zona, la cual actúa definitivamente sobre la velocidad de la reacción.
- ❖ Crear una turbulencia, captar y recircular las partículas volantes no quemadas completamente.
- ❖ El aire secundario contribuye a disminuir tanto las pérdidas de calor por incombustión química (q_3 , %), como las pérdidas de calor por incombustión mecánica (q_4 , %). González Dávila, O, (2011).

La hornilla eficiente con el principio de la multitubularidad constituye un gasificador de biomasa, sin embargo, se requiere de condiciones térmicas adecuadas para la garantía de este proceso de transformación térmica. La hornilla precedente que

sirve de base a este trabajo de diploma, presentó limitaciones importantes que la hicieron inapropiada para ser utilizada en biomasas residuales de pequeña granulometría.

Conclusiones parciales Capítulo I:

- 1 - La posibilidad del uso de cualquier biomasa en su estado natural, o con preparación previa, no resulta apropiado como alternativas de combustibles en los diseños de fogones y hornillas analizados.
- 2 - La madera es el combustible sólido que más se utiliza en la cocción de alimentos, y las tecnologías de combustión están diseñadas a satisfacer las exigencias de este combustible.
- 3 - Todas las variantes de fogones y hornillas analizados en la literatura utilizan el principio de dos combustiones, combustión primaria y combustión secundaria.
- 4 - La alternativa de la gasificación de las biomásas en general, para la cocción de alimentos está pobremente tratada en la literatura, aunque se dispone de suficiente información.
- 5 - El proceso de gasificación de biomásas se logra utilizando el principio de la multitubularidad, pero ello requiere que las condiciones térmicas aseguren temperaturas superiores a 700 °C.

Capítulo II. Modificación de hornilla eficiente

2.1 Caracterización de la hornilla precedente para la combustión de Biomosas.

2.1.1 Introducción.

La modificación y evaluación posterior del prototipo de hornilla eficiente, con el principio de la multitubularidad, está dirigido a satisfacer en lo posible los 10 Principios Fundamentales que se exigen en una tecnología de combustión para ser eficiente, considerándola como un sistema térmico que tome en cuenta el combustible, la tecnología de combustión y la aplicación, si todos estos factores se manejan adecuadamente, los resultados finales son los más favorables. No obstante, si se asegura que la tecnología resulte apropiada para garantizar la combustión eficiente del combustible sólido en cuestión, es un gran paso para la eficiencia del sistema térmico. Es importante resaltar que los 10 principios antes mencionados se establecieron para la leña como combustible.

¿Qué ocurrirá cuando se utilicen otros tipos de combustibles sólidos, como las biomosas no leñosas?

¿Qué modificaciones se requerirán en la tecnología, para que sea factible el funcionamiento con cualquier tipo de combustible?

Estas interrogantes tendrán respuestas en la evaluación de la hornilla, con todos los dispositivos y requerimientos necesarios para la garantía de una combustión eficiente.

2.1.2 Caracterización de la hornilla precedente.

La hornilla está formada por 3 partes fundamentales (Fig.2.1)

1-Cuerpo de la hornilla.

2- Cámara de combustión.

3-Hornilla para la olla con conductos de evacuación y chimenea.

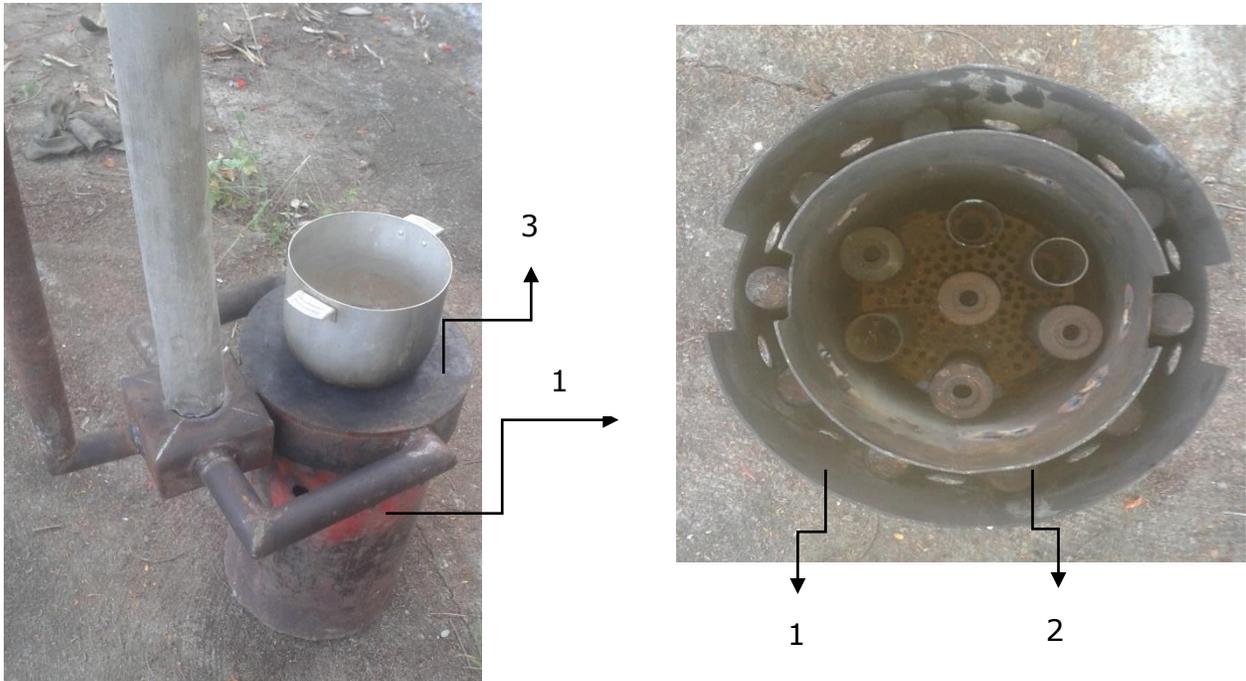


Fig. 2.1 hornilla completa, donde: 1- cuerpo principal de la hornilla. 2- Cámara de combustión. 3- hornilla para la olla.
Fuente: Elaboración Propia.

La hornilla con la Chimenea, conectada (Fig.2.1), alcanza una altura de 1,89 metros y un área media de 0,3 metros cuadrados, lo que la hace bastante compacta y apropiada de ser empleada en un hogar, siempre que se garantice la evacuación de los gases quemados al exterior.

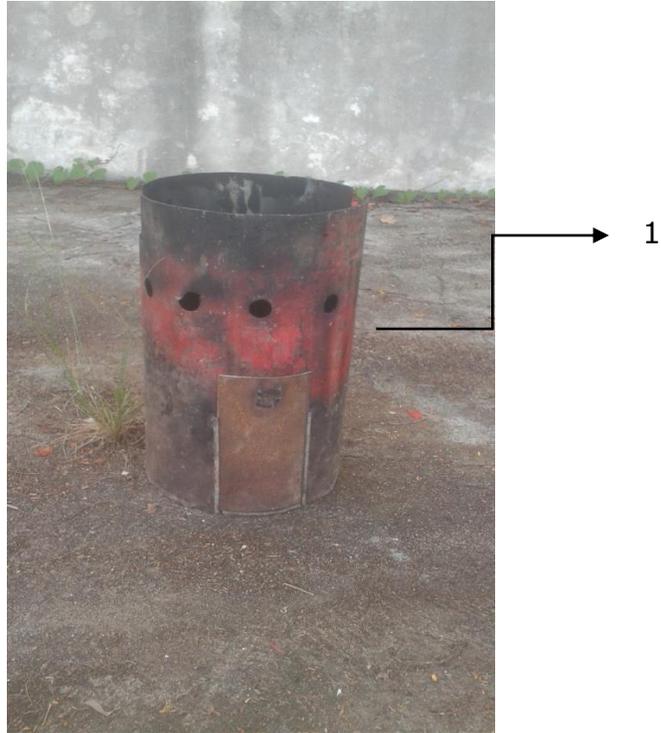


Fig. 2.2. Cuerpo principal de la Hornilla.
Fuente: Elaboración Propia.

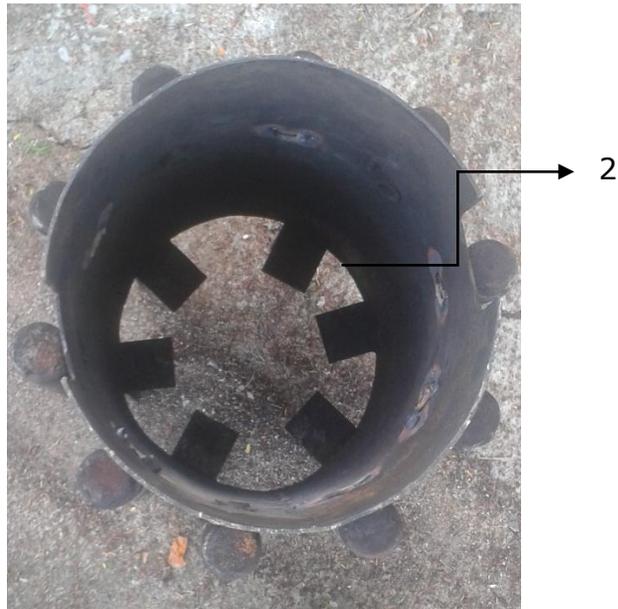


Fig. 2.3. Cámara de combustión.
Fuente: Elaboración Propia.

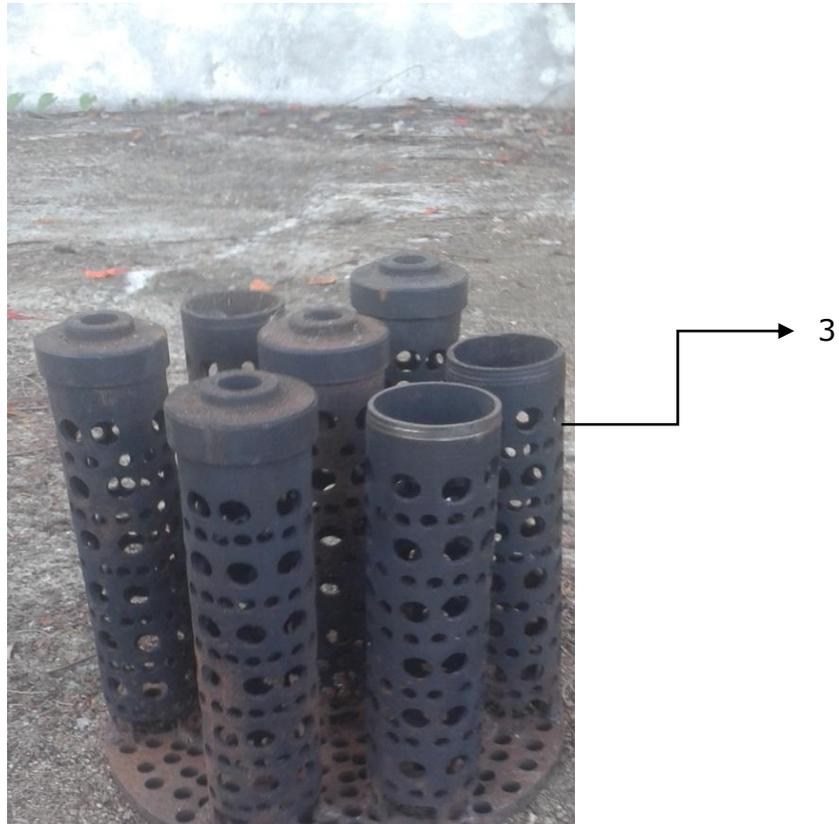


Fig. 2.4 Gasificadores.
Fuente: Elaboración Propia.

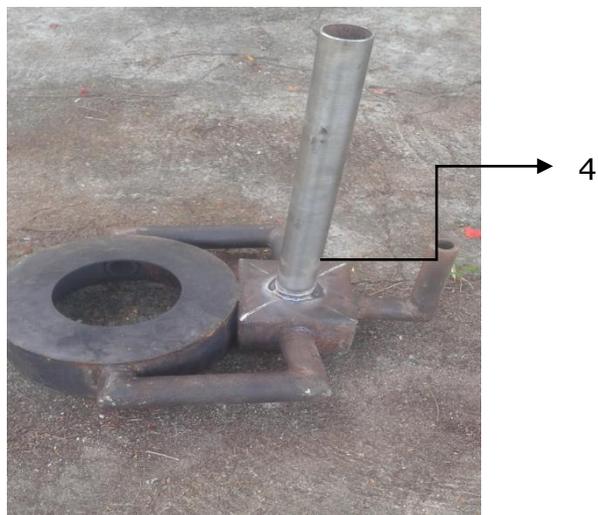


Fig. 2.5 hornilla para la olla, con colectores de gases de la combustión y chimeneas.
Fuente: Elaboración Propia.

1-Cuerpo principal de la hornilla (Fig. 2.6) está constituido por un depósito cilíndrico metálico (1) de 2mm de espesor, con una ventana en la parte inferior (3), que facilita la entrada y regulación del aire primario y los orificios que se observan en la parte superior (2), permiten la entrada de aire secundario de alimentación directo a la cámara de combustión por su parte superior.

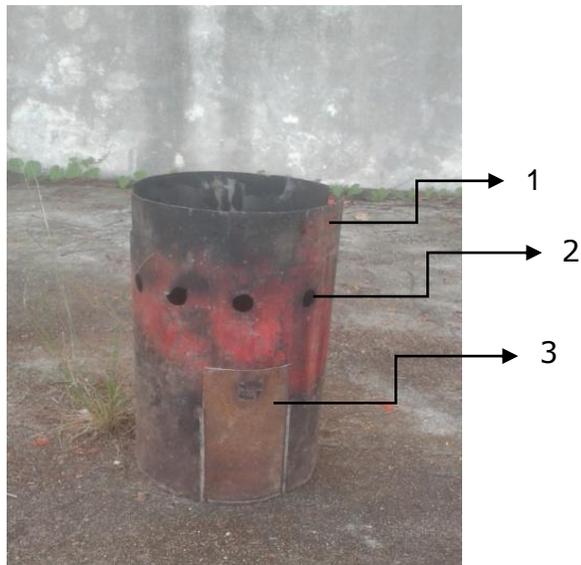
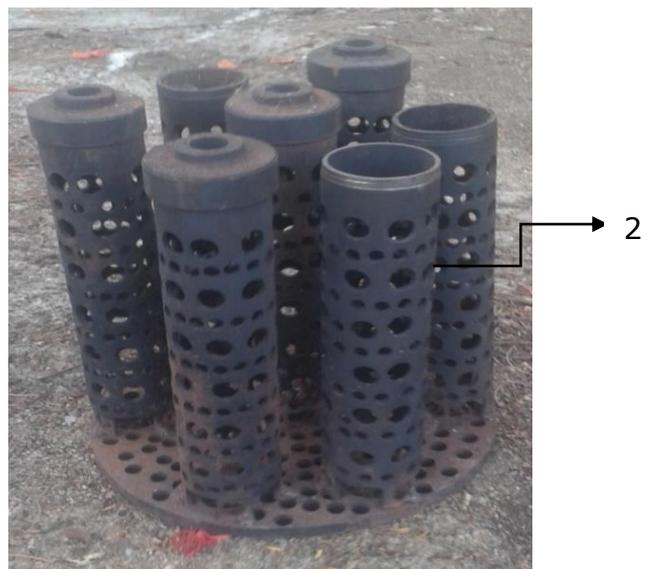


Fig. 2.6 Cuerpo principal de hornilla. 1-Cuerpo principal. 2-Orificios para el aire secundario. 3- Ventana para la evacuación de cenizas.

Fuente: Elaboración Propia.



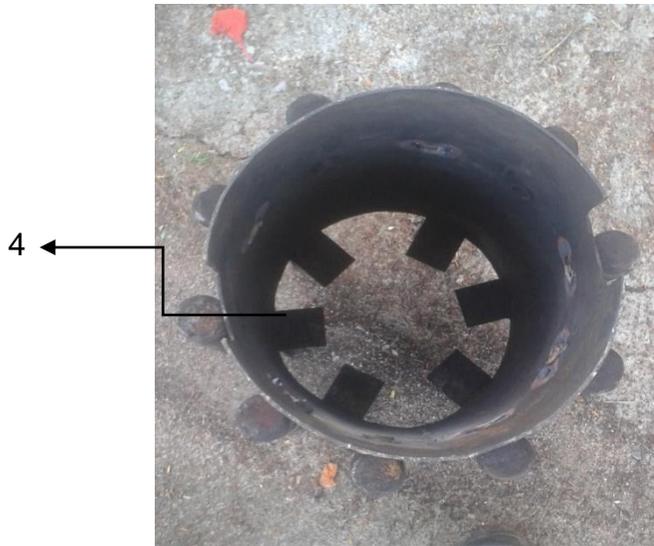


Fig. 2.7 Cámara de combustión.

- 1- Cuerpo cámara de combustión.
- 2- Parrilla de combustible con gasificadores.
- 3- Conducto de aire secundario.
- 4- Asiento de parrilla de combustión.

Fuente: Elaboración Propia.

Parrilla para el combustible con gasificadores.



Fig. 2.8. Parrilla con gasificadores.

Fuente: Elaboración Propia.

Este conjunto constituye la columna vertebral del funcionamiento de la hornilla y puede ser modificada para adecuarse a las características físicas del combustible. Su principal misión está en la dosificación del aire de alimentación que entra por la ventana situada en la porción lateral inferior del cuerpo de la hornilla, para asegurar la combustión primaria (Aire que hace contacto físico con el combustible de la parrilla) y la combustión secundaria (Aire que entrando por los orificios laterales superiores del cuerpo principal y por un conducto central de la parrilla, constituye el comburente para la combustión de los gases generados de la combustión primaria, en la parte superior de la cámara de combustión). Puede satisfacer tres alternativas de combustibles sólidos.

A. Parrilla con 3 gasificadores de 40 mm de diámetro y conducto central de aire secundario de 65 mm de diámetro. (Biomásas sin densificar fundamentalmente, con la opción de utilizar la leña en trozos o briquetas pequeñas)

B. Parrilla con 6 gasificadores de 40 mm de diámetro y conducto central de aire secundario de 65 mm de diámetro. (Biomásas sin densificar fundamentalmente, con la opción de utilizar la leña en trozos o briquetas pequeñas)

C. Parrilla sin gasificadores y con el conducto central de aire secundario, para combustibles en trozos (Leña o briquetas macizas o tubulares), no es conveniente el empleo de biomásas sin densificar.

Hornilla para la olla con conductos de evacuación y chimenea (Fig. 2.5).

La chimenea es un conducto cilíndrico metálico (acero) de 2mm de espesor, un diámetro interior de 65mm y una altura de 1375mm. Con una válvula para la regulación del tiro de gases. Trabajando de conjunto con el cuerpo de la (chimenea directa al fuego) aseguran el funcionamiento adecuado de la hornilla, posibilitando una velocidad al aire de entrada entre (0,3-0,7) m/s lo que se corresponde con un flujo medio de aire, entre ($2,2 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ y $4,96 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$).

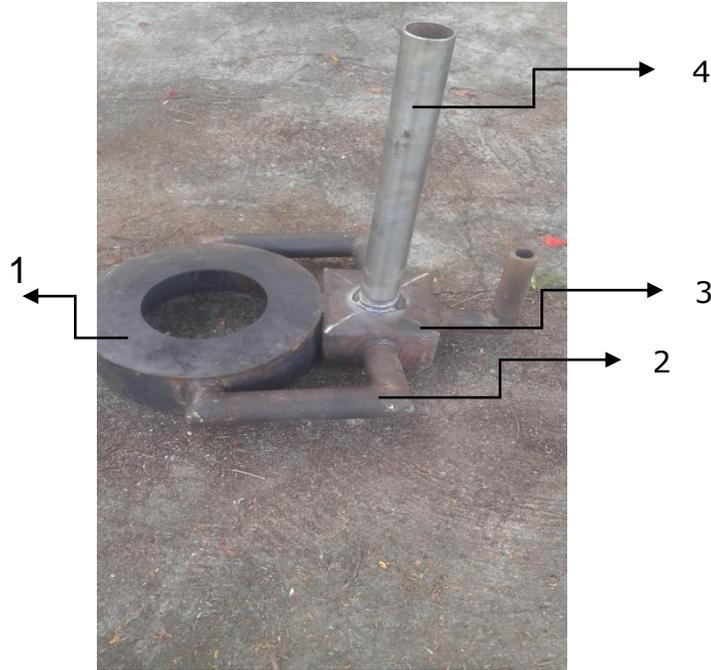


Fig. 2.9

1- Hornilla para olla.

2- Colector.

3- Chimenea principal.

4- Chimenea auxiliar.

Fuente: Elaboración Propia.

Los resultados de la evaluación preliminar de esta hornilla mostraron que la falta de aislamiento en el cuerpo exterior de la hornilla Fig. 2.2 no aseguró la temperatura necesaria para el proceso de gasificación dado que existe un espacio entre la cámara de combustión y este cuerpo, ocupado por el aire y ello provoca enfriamiento en la cámara de combustión lo que originó una carbonización del combustible, con un pobre aporte de energía, solo la parrilla con los 7 gasificadores de 40mm de diámetros, Fig. 2.4 tuvo un discreto comportamiento, lo que indica que el número de gasificadores es determinante en el proceso de gasificación. La evacuación de los gases fue deficiente, provocando una deficiente entrada de aire secundario para la combustión de los gases generados. La combustión de la leña presentó menos dificultades.

2.2 Modificación de la hornilla precedente para la garantía del proceso de gasificación combustión. (Formación 1)

2.2.1 Introducción.

La modificación de la hornilla precedente está determinada por su ineficiencia, ya que no se asegura el proceso de gasificación y las causas de este comportamiento están determinadas, fundamentalmente, por la falta de aislamiento exterior, el deficiente aire secundario de alimentación y su direccionamiento, la dificultad en la evacuación de los gases quemados en el proceso de combustión por tal motivo se hace necesaria la modificación.

2.2.2 Presentación de la hornilla precedente y la modificada.

En este epígrafe presentamos las formaciones partiendo de la hornilla precedente² y la hornilla modificada¹ con sus modificaciones.



Figura 2.10.

1- Muestra la hornilla actual modificada.

Fuente: Elaboración Propia.



Figura 2.11.

2- Muestra la hornilla precedente.

Fuente: Elaboración Propia.

A continuación, se presentan las modificaciones por elementos componentes de la hornilla.



Figura 2.11A
Cuerpo de la hornilla precedente.
modificada.

Fuente: Elaboración Propia

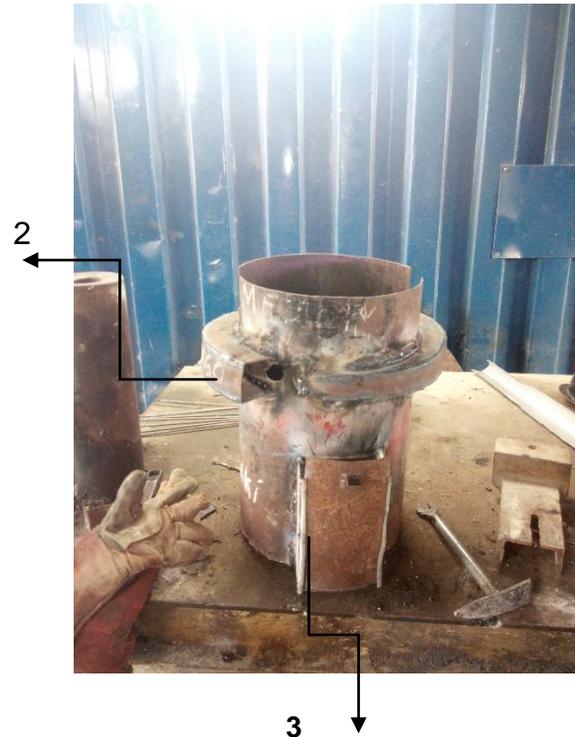


Figura 2.11B
Cuerpo de la hornilla

2 Difusores.

3 Cenicero desplazado.
Fuente: Elaboración Propia.

En la figura 2.11 A. Cuerpo de la hornilla precedentes 1constituido por un cilindro metálico con espesor 2mm y 12 orificios de 30mm en la parte superior, para el aire secundario y una ventana de evacuación de las cenizas en la parte inferior, también dispone de dos hendiduras el alojamiento del conducto de evacuación de los gases de la combustión, en la parte superior, por encima del conducto de aire secundario.

En la figura 2.11B. se muestra la modificación realizada en ese cuerpo que está constituida por la colocación de un difusor de sección variable de entrada

localizada a 180° que cubre los orificios de aire secundario, en la parte superior del cuerpo y el desplazamiento del cenicero de una magnitud de 60mm para la colocación posterior del aislamiento térmico.



Figura 2.12

1- Insulación del cuerpo de la hornilla actual.
precedente.

Fuente: Elaboración Propia.

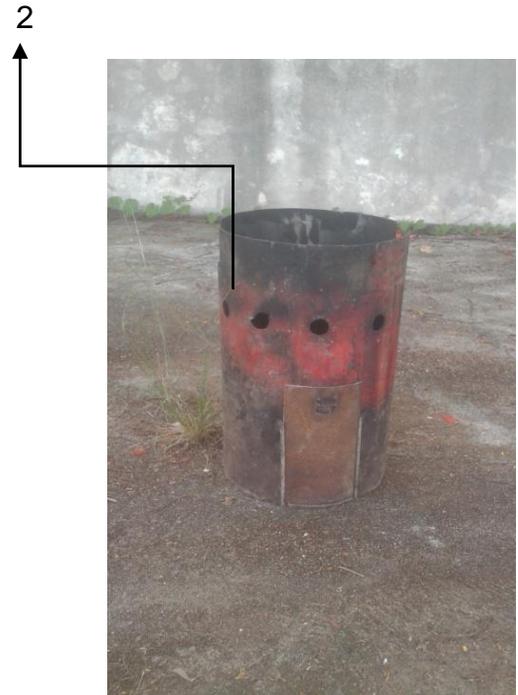


Figura 2.11 A

2- El cuerpo de la hornilla

Fuente: Elaboración Propia.

La figura 2.12 muestra el cuerpo de la hornilla actual insulado, la cual se realizó con el objetivo de retener el calor para mantener la garantía del proceso de gasificación, utilizando como aislante la lana de vidrio térmica con un espesor de 60mm y una lámina de aluminio protegiendo lana de vidrio de un espesor de 0.5mm.



Figura 2.13A

Cámara de combustible actual con las ranuras.



Figura 2.13B

Cámara de combustible

precedente. Esta figura 2.13B muestra la cámara de combustión de la hornilla precedente, con los conductos de aire secundario que están en la periferia, los cuales provocaban una elevada resistencia de la entrada de aire secundario en la cámara de combustión.

En la figura 2.13A muestra la modificación realizada en la cámara de combustión precedente, consistente en la eliminación de un grupo significativo de tubo de aire secundario dejando solamente 4 en cruz, para asegurar la separación de la cámara de combustión y el cuerpo de la hornilla además se practicaron orificios de 30mm de diámetro en la parte superior y por encima de estos se horadaron orificios rectangulares para simultáneamente aumentar la entrada de aire secundario además de la entrada por el difusor de aire secundario. También se practicó una ranura en la porción extrema superior de la cámara de combustión, para el alojamiento del conducto complementario de evacuación de los gases de la combustión y se eliminó el borde interior que cerraba el espacio entre el cuerpo y la cámara de combustión, facilitando con ello las labores de desmontaje de la

hornilla de la olla, así como el libre acceso del aire secundario a la cámara de combustión.



Figura 2.14

1- Salida de los gases adicional.

2- Borde interior eliminado.

Fuente: Elaboración Propia.

En la figura 2.14 se muestra la hornilla de la olla en su retroversión mostrando la modificación, consistiendo en la colocación de un conducto de 50mm de diámetro para aumentar la evacuación de los gases, además la eliminación del borde interior que cerraba la cámara de combustión y el cuerpo de la hornilla.

2.3 Hornilla modificada para la garantía del proceso de gasificación combustión. (Formación 2)

2.3.1 Introducción.

En esta segunda formación se elimina la cámara de combustión y se coloca una nueva parrilla de combustible tal como se observan las figuras que a continuación

se muestra. Este tipo de hornilla también está dirigida a satisfacer dentro de las posibilidades los 10 Principios Fundamentales que existen en una tecnología de combustión eficiente y las interrogantes expuesta en los epígrafes anteriores donde se menciona la utilización de otros tipos de combustible no leñoso y que modificaciones se requerían para este tipo de tecnología.



Figura 2.15.

- 1- La cámara de combustión extraída.
- 2- Cuerpo cilíndrico de acero con aislamiento de lana de vidrio.

Fuente: Elaboración Propia.

En este Epígrafe mostraremos otras modificaciones de la hornilla:



Figura 2.16.

1- Gasificadores.

2- Combustible biomasa (Bagazo de caña).

3- Malla exterior

La figura 2.16 muestra la modificación de la hornilla sin cámara de aire con una malla como reservorio del combustible, la cual hace función de cámara y permite que haya combustión en la parte periférica del combustible, garantizando con ello, la temperatura de gasificación. (Tiene particular significación cuando la hornilla carece de aislamiento térmico) Se utilizó como combustible bagazo de caña y la cascarilla de arroz, con tres gasificadores, de 60mm de diámetro 210 mm de altura.



Figura 2.17.

- 1- Combustible biomasa. (bagazo de caña)
- 2- Malla exterior.
- 3- Gasificadores.

Fuente: Elaboración Propia.

La figura 2.17 muestra la modificación de la hornilla sin cámara de aire con una malla la cual hace función de cámara y permite que haya combustión del combustible entre la pared del cilindro de acero del cuerpo y la malla, asegurando la temperatura de gasificación, de forma similar al caso precedente, se utilizaron en el experimento siete gasificadores de 40mm de diámetro y una altura de 190 mm.



Figura 2.18

1- Combustible biomasa (cascara de arroz).

2- Malla.

3- Gasificadores.

Fuente: Elaboración Propia.

En la figura 2.18 muestra la modificación de la hornilla sin cámara de aire con una malla la cual hace función de cámara y permite que haya combustión del combustible a las paredes del cilindro de acero y de este a la malla además ella retiene el combustible biomásicos, el cual es cascara de arroz y el experimento es con siete gasificadores, los cuales tienen un diámetro de 40mm.

Conclusiones Parciales del Capítulo 2.

- 1- Con la modificación del cuerpo de la hornilla aumenta la retención del calor en la cámara de combustión y un mayor calentamiento y direccionamiento del aire secundario a través del aislamiento térmico y los difusores correspondientes, garantizando con ellos un efectivo proceso de gasificación combustión.
- 2- La modificación de la cámara incrementa la entrada de aire secundario a la combustión.
- 3- La colocación de un conducto adicional en la tapa de la hornilla debe mejorar la evacuación de los gases y el incremento de la succión para la entrada de aire secundario.
- 4- La eliminación de la cámara de combustión para utilizar el cuerpo con aislamiento debe mejorar las condiciones térmica y favorecer el proceso de gasificación.
- 5- La colocación de un cesto de malla que separe el combustible de la superficie de la cámara combustión o de la superficie del cuerpo de la hornilla pudiera asegurar la temperatura de gasificación del combustible.

Capítulo III. Evaluación Térmica el Prototipo de Hornilla Eficiente, para la combustión de Biomosas.

3.1 Evaluación de la hornilla Eficiente modificada para la combustión de Biomosas.

3.1.1 Introducción.

La evaluación térmica de la hornilla eficiente modificada está dirigida:

- a. Medir la temperatura en diferentes lugares de la hornilla.
 1. Interior de la cámara de combustión
 2. Hornilla de la olla y su entorno.
 3. Conducto de evacuación de los gases de la combustión.
 4. Cámara de aire en la formación 1.
 5. Aislamiento térmico del cuerpo de la hornilla (Lana de vidrio).
 6. Ambiente cercano a la hornilla (0,5m).
- b. Determinación de la potencia térmica y la energía media de la hornilla, utilizando el modelo teórico establecido en trabajos precedentes.
- c. Determinación práctica de la potencia térmica y la energía media de la hornilla, utilizando como referencia fuentes conocidas.
- d. Determinación de la eficiencia del sistema térmico, tanto teórico como práctico y su comparación.

En la evaluación se precisó del empleo de dos formaciones de hornilla.

Formación 1. Hornilla con cámara de combustión y espacio de aire entre esta y el cuerpo.

- a- Combustible en contacto directo con la superficie metálica de la cámara de combustión, con 7 gasificadores de 40mm de diámetro y cascarilla de arroz y bagazo de caña como combustibles.
- b- Introducción de una cesta de malla que separa el combustible de la superficie metálica de la cámara de combustión (15mm), con 7 gasificadores y los mismos combustibles precedentes.

Formación 2. Hornilla con cámara de combustión formada con el cuerpo de la misma, sin espacio para el aire.

- a- Combustible en contacto directo con la superficie metálica del cuerpo de la hornilla con 3 gasificadores de 60mm de diámetro y cascarilla de arroz y bagazo de caña como combustibles.
- b- Introducción de una cesta de malla que separa el combustible de la superficie metálica del cuerpo o superficie de la cámara de combustión, con 3 gasificadores de 60 mm de diámetro y con 7 gasificadores de 40mm de diámetro, utilizando cascarilla de arroz y bagazo de caña como combustibles.

3.1.2 Metodología para la evaluación de la hornilla eficiente con el principio de la multitubularidad, para combustible de biomasa.

Pasos a seguir en el proceso de evaluación:

- 1- Suministro de combustible en la cámara de combustión hasta la altura de los gasificadores.
- 2- Colocar combustible de ignición por la ventana evacuación de las cenizas.
- 3- Colocar la tapa de la hornilla.
- 4- Después de haberse producido la ignición del combustible colocar el recipiente con el agua.
- 5- Medir el tiempo que demora en iniciar la ebullición del agua.
- 6- Medir el tiempo que permanece la ebullición del agua.
- 7- Tomar la medición de la cantidad de agua que queda después de haber concluido la ebullición de la misma.
- 8- Cuando se utiliza el recipiente o cesta de malla se realiza la carga de la misma forma que se explica en los pasos anteriores, pero fuera de la hornilla, posteriormente se introduce en la misma. Esto es aplicable a cualquiera de las dos formaciones evaluadas.

3.1.2.1 Determinación de la potencia térmica y la energía del proceso de gasificación de la hornilla (Método teórico experimental).

Para la determinación de la potencia térmica y la energía del proceso de gasificación se requiere de determinados parámetros geométricos y de resultados empíricos precedentes que constituyen criterios importantes para dichos cálculos aproximados.

Calculo del área de gasificación perimetral.

$$A_{gasif.perim} = \pi \cdot z_1 \cdot d \cdot H_{gasif} \quad (3.1)$$

Donde:

D ⇒ Diámetro del gasificador, (m).

z ⇒ Número de gasificadores.

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

Determinación de la energía del proceso de gasificación.

$$E_{gasif} = V_g \cdot \psi \cdot w_{total} , \text{ (kJ)} \quad (3.2)$$

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.

$$V_g = 5,6 \frac{Mj}{m^3} = 5600 \frac{kJ}{m^3} = 3733 \frac{kJ}{kg}$$

ψ **Índice de transformación de la biomasa (gasificación)** (González, 2011)

En la tabla 3.1 se muestran los valores de ψ para briquetas de biomasa con

$\frac{d}{D}^{eq} = (0,3; 0,5)$ y una masa inicial $w_0=1000g$.

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	0,3	950	0,033	170	802	165	5	0,80
Caña	0,5	950	0,068	82	673	77	8,7	0,67
Cáscara	0,3	970	0,047	120	763	115	6,7	0,76
de Café	0,5	970	0,073	77	670	72	9,3	0,67
Aserrín	0,3	990	0,053	106	756	101	7,5	0,75
(Madera)	0,5	990	0,086	66	640	61	10,6	0,64

Potencia térmica del proceso de gasificación.

$$N_{gasif} = 0,06 \cdot V_g \cdot ICP \quad , \text{ (kJ/h)} \quad (3.3)$$

$$N_{gasif} = 1,66 \cdot 10^{-5} \cdot V_g \cdot ICP \quad , \text{ (kW)} \quad (3.4)$$

Donde:

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

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

Cálculo del índice de combustión promedio (ICP) (Fundora I, 2009)

La ecuación empírica siguiente permite determinar de forma aproximada el índice de combustión promedio (ICP), para biomásas no leñosas.

$$ICP = 90,31 \cdot A_{gasif.perim} + 10,69 \Rightarrow \quad (3.5)$$

$$A_{gasif.perim} = z_1 \cdot \pi \cdot d \cdot H_{gasif} \Rightarrow , \text{ (m}^2\text{)}.$$

3.1.2.2 Determinación real de la potencia térmica y la energía de la hornilla evaluada, en las diferentes formaciones.

En este particular se utilizó una fuente de potencia conocida y se determinó el tiempo necesario para el comienzo de la ebullición de 1 litro de agua en un recipiente que coincidiera en la tecnología a evaluar.

Se utilizó una resistencia eléctrica con 0,8kW de potencia térmica, se determinó el tiempo en comenzar la ebullición y se hizo lo mismo en una hornilla de gas, el resultado mostró que la potencia térmica en esta última fue de 1,93kW de potencia térmica, con el mismo proceder se puede determinar la potencia térmica de la

hornilla para la combustión de biomásas. Con el tiempo efectivo de ebullición del agua en el recipiente es posible determinar la energía media en la hornilla ($T_{efc} = T_{i eb} + T_{p eb}$)

$$E = N \cdot T_{efc}, \text{ kW} \quad (3.6)$$

3.1.2.3 Determinación de la eficiencia del sistema térmico (η_{sc}) (Fundora, 2009)

$$\eta_{sc} = \frac{Q'_a}{Q'_{cb}} \cdot 100 \quad (3.7)$$

Donde: η_{sc} -eficiencia del sistema térmico, %

Q'_a -Calor absorbido por el agua, kJ/kg

Q'_{cb} -Calor cedido por la briqueta, kJ/kg

$$Q'_a = C_{pa} \cdot (T_f - T_0) + \left(1 - \frac{m_f}{m_a}\right) \cdot V \quad (\text{kJ/kg}) \quad (3.8)$$

Donde: C_{pa} -Calorespecífico molar del agua a presión constante. $C_{pa} = 4,18 \text{ kJ/kg}$

T_f -Temperatura final del agua, °K. $T_f = 373 \text{ °K}$

T_0 -Temperatura inicial del agua, °K. $T_0 = 300 \text{ °K}$

m_a -Masa inicial de agua, kg

m_f -Masa final de agua en el recipiente (resultados de experimentos), kg

V -Calor latente del agua, para la temperatura de 100°C o 373°K: $V = 2253,02 \text{ kJ/kg}$

$$Q'_{cb} = V_{cb} \quad (\text{kJ/kg}) \quad (3.9)$$

Donde: V_{cb} -Valor calórico del biogás generado en el proceso de gasificación [kJ/kg]

$$V_{cb} = 3733 \text{ kJ/kg} \quad (3.10)$$

Donde: H humedad de la paja de caña

Potencia efectiva específica del sistema térmico (N_{ef}):

$$N_{ef} = \frac{Q_a}{60 \cdot m \cdot t_{ef}} = \frac{1}{60 \cdot m} \cdot \left[\frac{m_a \cdot C_{pa} \cdot (T_f - T_0)}{t_e} + \frac{(m_a - m_f)}{t_{per}} \right] \cdot V, \text{ kW/kg} \quad (3.11)$$

Donde: Q_a -Calor absorbido por el agua; kJ.

t_{ef} - Tiempo efectivo de aprovechamiento de las briquetas; min. $T_{ef} = t_e + t_{per}$.

t_e - tiempo en que el agua alcanza la temperatura de 373°K.

tper - tiempo en que el agua permanece en la temperatura de 373°K.

Masa de briquetas necesarias:

3.3.2.4 Ejemplo de cálculo. (Formación 1)

Tabla 3.2 Temperaturas en diferentes localizaciones de la hornilla.

Localización	Formación	Temperatura en grado Celsius.
hornilla	1-A	417
Placa de aluminio	1-A	35
Cámara de combustión	1-A	732
Lana de vidrio	1-A	113
Cilindro de acero exterior	1-A	569
Cilindro de acero interior	1-A	699

- a) Hornilla recuperativa 0,7kg de biomasa no leñosa (Bagazo de caña) sin densificar, con 12% de humedad, parrilla con 7 gasificadores de 40mm de diámetro y una relación $d/D_{eq}=0,48$ para la briqueta multitubular formada.

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

Donde:

$d \Rightarrow 40(\text{mm})$.

$z \Rightarrow 7$.

$H \Rightarrow 220, (\text{mm})$.

$A_{gasif.perim} = 0,19 \text{ m}^2$

$$ICP = 90,31 \cdot A_{gasif.perim} + 10,69 \Rightarrow$$

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

ICP = 27,85g/min

$$E_{gasif} = V_g \cdot \psi \cdot w_{total}$$

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.

$$V_g = 5,6 \frac{Mj}{m^3} = 5600 \frac{kJ}{m^3} = 3733 \frac{kJ}{kg}$$

ψ Índice de transformación de la biomasa (gasificación)

$$E_{\text{Gasif}} = 1750,78 \text{ kJ}$$

$$N_{\text{gasif}} = 0,06 \cdot V_g \cdot ICP, \text{ kJ/h}$$

$$N_{\text{gasif}} = 1,66 \cdot 10^{-5} \cdot V_g \cdot ICP, \text{ kW}$$

Donde:

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

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

$$N_{\text{gasif}} = 6237,84 \text{ kJ/h}$$

$$N_{\text{gasif}} = 1,72 \text{ kW}$$

$$\eta_{\text{SC}} = Q_a / Q_{\text{cb}} \cdot 100 (\%)$$

Donde: Q_a Energía específica absorbida por el agua para la ebullición (kJ/kg)

Q_{cb} Energía específica que aporta el combustible en (kJ/kg).

$$Q_{\text{cb}} = 3733 \text{ kJ/kg}$$

η_{SC} Eficiencia del sistema térmico (%)

$$Q_a = C_{\text{pa}} \cdot (T_f - T_o) + (1 - m_{\text{fa}} / m_{0a}) \cdot \zeta$$

Donde:

C_{pa} Calor específico molar del agua a presión constante.

$$C_{\text{pa}} = 4,18 \text{ kJ/kg}$$

T_{fa} Temperatura final del agua ($^{\circ}\text{K}$)

$$T_{\text{fa}} = 373^{\circ}\text{K}$$

T_{0a} Temperatura inicial del agua ($^{\circ}\text{K}$)

$$T_{0a} = 300^{\circ}\text{K}$$

m_{0a} Masa inicial del agua en la olla (kg)

$$m_{0a} = 1 \text{ kg}$$

m_{fa} Masa final del agua en la olla, después de la evaporación.

$$m_{fa}=0,265\text{kg}$$

ζ Calor latente del agua, para una temperatura de 100°C, 373°K

$$\zeta =2253,02 \text{ kJ/kg}$$

$$Q_a=2107,56\text{kJ/kg.}$$

$$\eta_{sc} =56,46\%.$$

Condiciones del experimento:

a) Se suministró el agua en una olla directamente al fuego en la hornilla sobre la cámara de combustión, recibiendo calor por el fondo.

Masa inicial del agua; $m_{0a}=1\text{kg}$.

Masa final del agua; $m_{fa}=0,265\text{kg}$

$$\eta_{sc} =56,46\%.$$

Experimento real:

a) Se realiza la evaluación de este experimento en una hornilla de gas, donde se suministra un litro agua a una olla y se coloca directamente al fuego midiendo el tiempo en comenzar la ebullición, esto mismo se realiza para la hornilla de biomasa y por equivalencia con la primera fuente se determina la potencia de la hornilla de biomasa

Potencia fogón de gas \longrightarrow tiempo de comienzo de la ebullición del gas

Potencia hornilla de biomasa \longrightarrow tiempo de comienzo de la ebullición del fogón

$$\text{Potencia fogón de gas} = 1,93 \text{ kW}$$

$$\text{Potencia fogón de gas} = N_{\text{fogón gas}}$$

Tiempo de comienzo de la ebullición del agua en el fogón del gas $t_{eb}= 0,1 \text{ h}$

Tiempo de comienzo de la ebullición del agua en la hornilla de biomasa $t_{eb}= 0,13\text{h}$

$$\text{Potencia de hornilla de biomasa real} = 2,5 \text{ kW}$$

$$\text{Potencia de hornilla de biomasa real} = N_{\text{horn}}$$

$$\text{Energía hornilla de biomas real} = N_{\text{biomas.}} \cdot t_{\text{efect}}$$

$t_{\text{efect}}= t_e \text{ ebullición} + \text{tiempo de permanencia en ebullición}$

$$T_{\text{efect}}= 0,13+ 0,42$$

$$t_{\text{efect}} = 0,55\text{h}$$

t_{efect} = tiempo efectivo

Energía de hornilla de biomasa Real = 2,5. 0,55

E_{horn} = Energía de hornilla de biomasa.

Energía hornilla de biomasa real = 1,38 kW/h

Tabla 3.3 Temperaturas en diferentes localizaciones de la hornilla.

Localización	Formación	Temperatura en grado Celsius.
hornilla	1-B	410
Placa de aluminio	1-B	36
Cámara de combustión	1-B	715
Lana de vidrio	1-B	105
Cilindro de acero exterior	1-B	575
Cilindro de acero interior	1-B	702

- b) Hornilla recuperativa 0.5kg de biomasa no leñosa (bagazo de caña) sin densificar, con 12% de humedad, parrilla con 7 gasificadores de 40mm de diámetro y una relación $d/D_{\text{eq}}=0,48$ para la briqueta multitubular formada.

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

Donde:

$d \Rightarrow 40$, (mm).

$z \Rightarrow 7$.

$H \Rightarrow 220$, (mm).

$A_{\text{gasifperim}} = 0,19\text{m}^2$

$$ICP = 90,31 \cdot A_{\text{gasif.perim}} + 10,69 \Rightarrow$$

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

ICP = 27,85 g/min

$$E_{\text{gasif}} = V_g \cdot \psi \cdot w_{\text{total}}$$

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.

$$V_g = 5,6 \frac{Mj}{m^3} = 5600 \frac{kJ}{m^3} = 3733 \frac{kJ}{kg}$$

ψ Índice de transformación de la biomasa (gasificación)

$$E_{\text{Gasif}} = 1250,55 \text{ kJ}$$

$$N_{\text{gasif}} = 0,06 \cdot V_g \cdot ICP, \text{ kJ/h}$$

$$N_{\text{gasif}} = 1,66 \cdot 10^{-5} \cdot V_g \cdot ICP, \text{ kW}$$

Donde:

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

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

$$N_{\text{gasif}} = 6237,84 \text{ kJ/h}$$

$$N_{\text{gasif}} = 1,72 \text{ kW}$$

$$\eta_{\text{SC}} = Q_a / Q_{\text{cb}} \cdot 100 (\%)$$

Donde: Q_a Energía específica absorbida por el agua para la ebullición (kJ/kg)

Q_{cb} Energía específica que aporta el combustible en (kJ/kg).

$$Q_{\text{cb}} = 3733 \text{ kJ/kg}$$

η_{SC} Eficiencia del sistema térmico (%)

$$Q_a = C_{\text{pa}} \cdot (T_f - T_o) + (1 - m_{\text{fa}} / m_{0a}) \cdot \zeta$$

Donde:

C_{pa} Calor específico molar del agua a presión constante.

$$C_{\text{pa}} = 4,18 \text{ kJ/kg}$$

T_{fa} Temperatura final del agua ($^{\circ}\text{K}$)

$$T_{\text{fa}} = 373^{\circ}\text{K}$$

T_{0a} Temperatura inicial del agua ($^{\circ}\text{K}$)

$$T_{0a} = 300^{\circ}\text{K}$$

m_{0a} Masa inicial del agua en la olla (kg)

$$m_{0a} = 1 \text{ kg}$$

m_{fa} Masa final del agua en la olla, después de la evaporación.

$$m_{fa}=0,350\text{kg}$$

ζ Calor latente del agua, para una temperatura de 100°C , 373°K

$$\zeta = 2253,02 \text{ kJ/kg}$$

$$Q_a = 1769,60 \text{ kJ/kg.}$$

$$\eta_{sc} = 47,40\%.$$

Condiciones del experimento:

a) Se suministró el agua en una olla directamente al fuego, en la hornilla sobre la cámara de combustión, recibiendo calor por el fondo.

Masa inicial del agua; $m_{0a}=1\text{kg}$.

Masa final del agua; $m_{fa}=0,350\text{kg}$

$$\eta_{sc} = 47,40\%.$$

Experimento real:

a) Se realiza la evaluación de este experimento en una hornilla de gas, donde se suministra un litro agua a una olla y se coloca directamente al fuego midiendo el tiempo en comenzar la ebullición, esto mismo se realiza para la hornilla de biomasa y por equivalencia con la primera fuente se determina la potencia de la hornilla de biomasa

Potencia fogón de gas \longrightarrow tiempo de comienzo de la ebullición del gas

Potencia hornilla de biomasa \longrightarrow tiempo de comienzo de la ebullición del fogón

$$N_{\text{fogon gas}} = 1,93 \text{ kW}$$

Tiempo de comienzo de la ebullición del agua en el fogón de gas $t_{eb} = 0,1 \text{ h}$

Tiempo de comienzo de la ebullición en la hornilla de biomasa $t_{eb} = 0,1 \text{ h}$

Potencia de la hornilla de biomasa real

$$N_{\text{hornilla}} = 1,93 \text{ kW}$$

Energía hornilla de biomasa real = $N_{\text{hornilla}} \cdot T_{\text{efect}}$

$T_{\text{efect}} = t_{\text{ebullición}} + \text{tiempo de permanencia en ebullición}$

$$T_{\text{efect}} = 0,1 + 0,57$$

$$T_{\text{efect}} = 0,67 \text{ h}$$

Tefect = tiempo efectivo

Energía de la hornilla Real = 1,93. 0,67

E_{hornilla} = 1,29 kW/h

Energía de la hornilla real = 1,29 kW/h

3.3.2.5 Ejemplo de cálculo. (Formación 2)

Tabla 3.4 Temperaturas en diferentes localizaciones de la hornilla.

Localización	Formación	Temperatura en grado Celsius.
hornilla	2-A	556,1
Placa de aluminio	2-A	43
Cámara de combustión	2-A	905
Lana de vidrio	2-A	200
Cilindro de acero exterior	2-A	489
Cilindro de acero interior	2-A	699
chimenea	2-A	77
Salida de la chimenea	2-A	74,16

- c) Hornilla recuperativa 1.5kg de biomasas no leñosa (Bagazo de caña) sin densificar, con 12% de humedad, parrilla con 3 gasificadores de 60mm de diámetro y una relación $d/D_{eq}=0,46$ para la briqueta multitubular formada.

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

Donde:

$d \Rightarrow 60$, (mm).

$z \Rightarrow 3$.

$D \Rightarrow 220$, (mm).

$A_{gasif.perime} = 0,124m^2$

$$ICP = 90,31 \cdot A_{gasif.perim} + 10,69 \Rightarrow$$

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

$$ICP = 21,53\text{g/min}$$

$$E_{gasif} = V_g \cdot \psi \cdot w_{total}$$

Donde:

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

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

$$V_g = 5,6 \frac{\text{Mj}}{\text{m}^3} = 5600 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^3} = 3733 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

ψ Índice de transformación de la biomasa (gasificación)

$$E_{Gasif} = 3751,67 \text{ kJ}$$

$$N_{gasif} = 0,06 \cdot V_g \cdot ICP, \text{ kJ/h}$$

$$N_{gasif} = 1,66 \cdot 10^{-5} \cdot V_g \cdot ICP, \text{ kW}$$

Donde:

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

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

$$N_{gasif} = 4822,29 \text{ kJ/h}$$

$$N_{gasif} = 1,33 \text{ kW}$$

$$\eta_{SC} = Q_a / Q_{cb} \cdot 100 (\%)$$

Donde: Q_a Energía específica absorbida por el agua para la ebullición (kJ/kg)

Q_{cb} Energía específica que aporta el combustible en (kJ/kg).

$$Q_{cb} = 3733 \text{ kJ/kg}$$

η_{SC} = Eficiencia del sistema térmico (%)

$$Q_a = C_{pa} \cdot (T_f - T_o) + (1 - m_{fa} / m_{0a}) \cdot \zeta$$

Donde:

C_{pa} Calor específico molar del agua a presión constante.

$$C_{pa} = 4,18 \text{ kJ/kg.}$$

T_{fa} Temperatura final del agua ($^{\circ}\text{K}$)

$$T_{fa} = 373^{\circ}\text{K}$$

T_{oa} Temperatura inicial del agua ($^{\circ}\text{K}$)

$$T_{0a}=300^{\circ}\text{K}$$

m_{0a} Masa inicial del agua en la olla (kg)

$$m_{0a} = 1\text{kg}$$

m_{fa} Masa final del agua en la olla, después de la evaporación.

$$m_{fa}=0,012\text{kg}$$

ζ Calor latente del agua, para una temperatura de 100°C , 373°K

$$\zeta =2253,02 \text{ kJ/kg}$$

$$Q_a=2287,66\text{kJ/kg.}$$

$$\eta_{sc} =61,28\%.$$

Condiciones del experimento:

a) Se suministró el agua en una olla directamente al fuego, en la hornilla sobre la cámara de combustión, recibiendo calor por el fondo.

Masa inicial del agua; $m_{0a}=1\text{kg}$.

Masa final del agua; $m_{fa}=0,012\text{kg}$

$$\eta_{sc} =61,28\%.$$

Experimento real:

b) Se realiza la evaluación de este experimento en una hornilla de gas, donde se suministra un litro agua a una olla y se coloca directamente al fuego midiendo el tiempo en comenzar la ebullición, esto mismo se realiza para la hornilla de biomasa y por equivalencia con la primera fuente se determina la potencia de la hornilla de biomasa

Potencia fogón de gas \longrightarrow tiempo de comienzo de la ebullición del gas

Potencia hornilla de biomasa \longrightarrow tiempo de comienzo de la ebullición del fogón

$$\text{Potencia gas} = 1,93 \text{ kW}$$

$$\text{Tiempo de comienzo de la ebullición del gas } t_e = 0,1\text{h}$$

$$\text{Tiempo de comienzo de la ebullición del fogón } t_e = 0,12\text{h}$$

$$\text{Potencia del fogón } N_{\text{fogon}}= 2,31 \text{ kW}$$

$$\text{Energía fogón real} = N_{\text{fogon}} \cdot T_{\text{fect}}$$

Tefect= te ebullición +tiempo de permanencia en ebullición

Tefect= 0,12+0,63

Tefect = 0,75h

Tefect = tiempo efectivo (h)

Energía del fogón Real

E_{hornilla} = 1,73 kW/h

Tabla 3.5 Temperaturas en diferentes localizaciones de la hornilla.

Localización	Formación	Temperatura en grado Celsius.
hornilla	2-B	418
Placa de aluminio	2-B	42
Cámara de combustión	2-B	724
Lana de vidrio	2-B	98
Cilindro de acero exterior	2-B	506
Cilindro de acero interior	2-B	480
Salida de chimenea	2-B	76,45
chimenea	2-B	71,87

- d) Hornilla recuperativa 1kg de biomasa no leñosa (bagazo de caña) sin densificar, con 12% de humedad, parrilla con 7 gasificadores de 40mm de diámetro y una relación $d/D_{eq}=0,48$ para la briqueta multitubular formada.

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

Donde:

$d \Rightarrow 0,4, (m).$

$z \Rightarrow 7.$

$H \Rightarrow 220, (m).$

$A_{gasif.perime} = 0,19m^2$

$ICP = 90,31 \cdot A_{gasif.perim} + 10,69 \Rightarrow$

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

ICP = 27,85g/min

$$E_{gasif} = V_g \cdot \psi \cdot w_{total}$$

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.

$$V_g = 5,6 \frac{Mj}{m^3} = 5600 \frac{kJ}{m^3} = 3733 \frac{kJ}{kg}$$

ψ Índice de transformación de la biomasa (gasificación)

$$E_{Gasif} = 2501,11 \text{KJ}$$

$$N_{gasif} = 0,06 \cdot V_g \cdot ICP, \text{ kJ/h}$$

$$N_{gasif} = 1,66 \cdot 10^{-5} \cdot V_g \cdot ICP, \text{ kW}$$

Donde:

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

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

$$N_{gasif} = 6237.84 \text{ kJ/h}$$

$$N_{gasif} = 1.72 \text{ kW}$$

$$\eta_{SC} = Q_a / Q_{cb} \cdot 100 (\%)$$

Donde: Q_a Energía específica absorbida por el agua para la ebullición (kJ/kg)

Q_{cb} Energía específica que aporta el combustible en (kJ/kg).

$$Q_{cb} = 3733 \text{ kJ/kg}$$

η_{SC} Eficiencia del sistema térmico (%)

$$Q_a = C_{pa} \cdot (T_f - T_o) + (1 - m_{fa} / m_{0a}) \cdot \zeta$$

Donde:

C_{pa} Calor específico molar del agua a presión constante.

$$C_{pa} = 4,18 \text{ kJ/kg}$$

T_{fa} Temperatura final del agua ($^{\circ}\text{K}$)

$$T_{fa} = 373^{\circ}\text{K}$$

T_{0a} Temperatura inicial del agua ($^{\circ}K$)

$$T_{0a}=300^{\circ}K$$

m_{0a} Masa inicial del agua en la olla (kg)

$$m_{0a} = 1\text{ kg}$$

m_{fa} Masa final del agua en la olla, después de la evaporación.

$$m_{fa}=0,04\text{ kg}$$

ζ Calor latente del agua, para una temperatura de $100^{\circ}C$, $373^{\circ}K$

$$\zeta =2253,02\text{ kJ/kg}$$

$$Q_a=2475,04\text{ kJ/kg.}$$

$$\eta_{sc} =66,30\%.$$

Condiciones del experimento:

a) Se suministró el agua en una olla directamente al fuego, en la hornilla sobre la cámara de combustión, recibiendo calor por el fondo.

Masa inicial del agua; $m_{0a}=1\text{ kg}$.

Masa final del agua; $m_{fa}=0,04\text{ kg}$

$$\eta_{sc} =66,30\%.$$

Experimento real:

c) Se realiza la evaluación de este experimento en una hornilla de gas, donde le suministramos agua a una olla y la colocamos directamente al fuego y evaluamos con la misma cantidad de agua, en un mismo tiempo de permanecía de la ebullición del líquido experimental la energía y la potencia de la hornilla de gas para formar una razón de equivalencia.

Potencia gas	→	tiempo de comienzo de la ebullición del gas
Potencia fogón	→	tiempo de comienzo de la ebullición del fogón

Potencia gas

$$N_{\text{fogon gas}} = 1,93\text{ kW}$$

Tiempo de comienzo de la ebullición en fogón de gas, tomado como referencia

$$t_{eb} = 0,1\text{ h}$$

Tiempo de comienzo de la ebullición en la hornilla para la combustión de biomasa.

$$t_{eb} = 0,13\text{ h}$$

Potencia de la hornilla de biomasa real

$$N_{\text{hornilla}} = 2,5 \text{ kW}$$

Energía hornilla de biomasa real = $N_{\text{hor. Tefect}}$

Tefect= te ebullición +tiempo de permanencia en ebullición

$$T_{\text{efect}} = 0,13+0,42$$

$$T_{\text{efect}} = 0,55\text{h}$$

T_{efect} = tiempo efectivo

$$E_{\text{hor}} = 1,38 \text{ kW/h}$$

Tabla 3.6 resultado de los cálculos experimentales.

Form	d_g mm	Zg	d/D eq	T_H °C	Nreal kW	Ereal kWh	E_{disp} kWh	N_{disp} kW	η_{sc} %
1-A	40	7	0,48	732	2,5	1,38	0,49	1,72	56,46
1_A	40	7	0,48	730	2,1	1,25	0,45	1,69	54,20
1-B	40	7	0,48	715	1,93	1,29	0,34	1,72	47,40
1-B	40	7	0,48	710	1,90	1,20	0,30	1,65	45,30
2-A	60	3	0,46	905	2,31	1,73	1,04	1,33	61,28
2-A	60	3	0,42	702	2,10	1,50	1,00	1,30	45,60
2-B	40	7	0,48	724	2,57	1,38	0,64	1,72	66,30
2'B	40	7	0,48	720	2,50	1,30	0,60	1,71	64,10

3.3.3 Valoración medio ambiental del uso de la hornilla.

Si se toma como referencia la hornilla eléctrica de que se dispone en los hogares cubanos, a raíz de la Revolución energética y de otros dispositivos vinculados a la cocción de alimentos (olla multipropósito, calentadores de agua, etc.)

Se dispone de una energía específica media por unidad de superficie de 56,4 (kW/h)/m², para una temperatura disponible media de 470°C, que posibilita dar respuesta a la demanda media de un hogar de (3-7) personas, si se emplea una olla de 220mm de diámetro 38*10⁻³m² de superficie, funcionando durante 2 horas, en la cocción de algún alimento (frijoles etc.), presenta un consumo medio de corriente eléctrica de 2,16 kW/h.

La Termoeléctrica “Carlos M: de Céspedes” consume 0,4kg de Fuel Oil, para la generación de un kW/h de energía eléctrica, si se toma en cuenta, que la tonelada de éste combustible, se cotiza en el Mercado Internacional actualmente a 420 USD, el gasto para generar 2,16 kW/h, sería de 0,86 kg de Fuel Oil, con un costo de 0,36 USD. Sin embargo la hornilla de biomasa con un área similar a la superficie de la resistencia eléctrica, con temperatura similar, puede producir una energía térmica equivalente a 2,25 kW/h, que representa la energía térmica que aporta la resistencia, con sólo 2 kg de biomasa no leñosas residuales, que no tienen valor agregado y que en su descomposición pueden generar al medio ambiente gas Metano, 20 veces más perjudicial para el efecto de invernadero que el CO₂ neutro, que se produce en la combustión de las biomasa.

Recuerde que el CO₂ de la combustión de los fósiles no tiene balance con la fotosíntesis que tiene lugar en las plantas. Compárese además La energía equivalente que resulta de la transformación de la energía eléctrica en calor en una resistencia eléctrica y el gasto correspondiente en combustible fósil, ello sería equivalente a más de 2,5 (kW/h)/kg. Sin embargo la utilización de la hornilla investigada puede producir entre (1,40 - 2,97) (kW/h)/kg de energía térmica equivalente, utilizando leña o biomasa residuales (El primer valor se refiere a las condiciones de peor comportamiento y el segundo, para elevadas eficiencia del sistema de combustión).

Tal vez ésta no sea la comparación más feliz, ya que se requiere de determinadas condiciones para el uso de ésta tecnología, sobre todo en las zonas urbanas. Sin embargo en las zonas rurales, como uso doméstico, social y en pequeñas industrias de la cerámica y panaderías, resulta totalmente factible, al disponer de una tecnología flexible capaz de aceptar cualquier tipo de biomasa, con índices de eficiencia que pueden duplicar a las tecnologías existentes. Lo que implica hacer un uso racional de la leña (Si es el combustible que se dispone esencialmente) y de las otras alternativas de biomasa, posibilitando hacer un balance entre todas las posibilidades que se dispongan, ello es esencial para el medio ambiente.

Conclusiones parciales del Capítulo 3.

- Existe una adecuada correspondencia entre los resultados del modelo teórico experimental precedente con los resultados de las mediciones reales en el experimento, con las diferentes formaciones de la hornilla para la combustión de biomásas, en cuanto a la potencia energía y eficiencia del sistema térmico.
- Los resultados obtenidos en la evaluación de la hornilla de biomásas con 3 gasificadores de 60 mm de diámetro para la formación 1 (Con cámara de combustión separada del cuerpo de la hornilla) tuvo un buen comportamiento con las biomásas leña, aserrín de madera y bagazo de caña, no así con la cascarilla de arroz que no logró la gasificación (Las biomásas Aserrín de madera y leña no se incluyeron en el trabajo porque los resultados fueron óptimos). La formación 2 (Con cámara de combustión en contacto directo con el cuerpo de la hornilla) resultaron muy favorables, con independencia del tipo de combustible.
- Los resultados del comportamiento de la combustión con 7 gasificadores de 40 mm de diámetro ($d/D_{\text{equ}} = 0,48$) fueron favorables en ambas formaciones, desde todos los puntos de vista.
- La inserción de la cesta de malla para el combustible, favoreció los índices de combustión para las dos formaciones incluyendo el caso de la cascarilla de arroz con 3 gasificadores de 60 mm de diámetro ($d/D_{\text{equ}} = 0,46$).
- La temperatura a 0,5 m de la hornilla resultó ser de 36°C , lo que demuestra la efectividad de la lana de vidrio como aislamiento, siempre que el espesor este por encima de 50 mm.
- La introducción del aislamiento térmico en la parte exterior del cuerpo de la hornilla, además de la colocación de los difusores y la utilización de la cesta de malla como receptáculo del combustible, resultó esencial para la garantía del proceso de gasificación y contribuyó a los elevados índices térmicos registrados.

Conclusiones Generales.

- La modificación de la hornilla precedente constituye en esencia una nueva tecnología flexible, con posibilidades de investigar diferentes tipos de biomásas, con diferentes relaciones d/D y ello permitirá realizar nuevos diseños que se adapten a requerimientos deseados.
- El aislamiento exterior del cuerpo de la hornilla contribuyó a la garantía del mejoramiento de los índices térmicos de la hornilla, para todas las formaciones.
- El incremento del número de gasificadores, es más significativa en el proceso de gasificación, que el diámetro, para una similar relación d/D próxima a 0,5, con 7 gasificadores de 40 mm de diámetro, en todas las formaciones tuvo un comportamiento efectivo, sin embargo, con 3 gasificadores de 60mm de diámetro, en la cascarilla de arroz, no gasificó, por consiguiente, no funcionó la tecnología con este tipo de biomasa.
- La evaluación de la hornilla mostró a) la necesidad de la ignición del combustible por toda la sección inferior de la biomasa, b) El incremento del aire secundario por encima del valor que la hornilla proporcionó, c) Incrementar la dimensión de los conductos de evacuación de los gases de la combustión.
- La incorporación de la cesta de malla como receptáculo de combustible biomásico en las formaciones analizadas, resultó la alternativa que asegura el funcionamiento eficiente de la hornilla para cualquier combustible sólido con relaciones d/D incluso inferior a 0,5. Incluso en la alternativa sin aislamiento térmico
- El impacto ambiental del uso de la hornilla evaluada o las que se diseñen con estos principios es realmente significativo y sustentable.

Recomendaciones.

- Continuar la evaluación de otras alternativas de biomasas con otras relaciones d/D.
- Diseñar hornillas, fogones sociales y hornos utilizando los resultados de la evaluación precedente.

Bibliografía:

- Abel Leyva, F., Fundora Beltrán, P. (2002.). *Construcción del fogón- gasificador para la investigación de combustión de sólidos*. (Tesis de Grado). Universidad de Cienfuegos Carlos Rafael Rodríguez, Cienfuegos, Cuba.
- Arrollo, J. S. & R., W. S. (2016). Aprovechamiento del recurso biomasa a partir de los desechos de madera para una caldera de vapor. *Ciencia y Tecnología*, 16, 20-29.
- Bilandzija, N., Voca, N., Jelcic, B., Jurisic, V., Matin, A., Grubor, M. & Kricka, T. (2018). Evaluation of Croatian agricultural solid biomass energy potential. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 93(2018), 225–230. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.05.040>
- Borroto Nordelo, A. (2007). *Combustión y Generación de Vapor*. Cienfuegos, Cuba: *Editorial Universo Sur*.
- Blanco, A. (2018). Situación de las energías renovables en América Latina y el Caribe. Paper presented at the Forum “Energía Sostenible Cuba 2018”, La Habana, Cuba.
- Carrasco, S. Y. (2018). Metodología para la evaluación del proceso de co/combustión de biomásas a partir de diferentes tecnologías en una caldera Retal. (Tesis de Grado). Universidad Carlos Rafael Rodríguez, Cienfuegos, Cuba.
- Cristóbal, J. R. S. (2010). Multi-criteria decision-making in the selection of a renewable energy project in Spain: The Vikor method. *Renewable Energy*, 36(2011), 498-502. doi: 10.1016/j.renene.2010.07.031
- Enrique Melián, Y. (2015). *Diseño y construcción de prototipo de hornilla eficiente con el principio de la multitubularidad*. (Tesis de Grado). Universidad de Cienfuegos Carlos Rafael Rodríguez, Cienfuegos, Cuba.
- Fernández Conde, E. (1994). *Termodinámica Técnica*. La Habana, Cuba: *Editorial Félix Varela*.

- Fundora Acea, I. (2009). *Influencia de la geometría y la densidad de las briquetas cilíndricas tubulares y multitubulares de las biomásas, en los índices fundamentales de combustión*. (Tesis de Maestría). Universidad de Cienfuegos Carlos Rafael Rodríguez, Cienfuegos, Cuba.
- Fundora Beltrán, P. (2003). *Estudio del proceso de densificación gradual de la paja de caña, para el perfeccionamiento de su proceso tecnológico*. (Tesis de Grado). Universidad de Cienfuegos Carlos Rafael Rodríguez, Cienfuegos, Cuba.
- Gálvez, L. O. (2000). *Manual de los derivados de la caña de azúcar*. ICIDCA. (Tercera ed.). La Habana, Cuba.
- García, J. A. (2017). *Evaluación preliminar del potencial de las diferentes biomásas de la provincia de Cienfuegos*. (Tesis de Grado). Universidad Carlos Rafael Rodríguez, Cienfuegos, Cuba.
- González Maqueira, M. (2000). *Estudio teórico sobre la combustión heterogénea, aplicación a la combustión de biomásas*. (Tesis de Grado). Escuela Superior de Ingeniería Industriales y Minas de Vigo, Vigo, España.
- González Dávila, O. (2011). *Metodología para el diseño de fogones gasificadores de biomásas, utilizando el principio de la multitubularidad en el combustible*. (Tesis de Grado). Universidad de Cienfuegos Carlos Rafael Rodríguez, Cienfuegos, Cuba.
- Infante González, C. (2010). *Evaluación térmica de prototipo de hornillas eficientes para diferentes Biomásas*. (Tesis de Grado). Universidad de Cienfuegos Carlos Rafael Rodríguez, Cienfuegos, Cuba.
- Meneses Subarnaba, Y. (2008). *Evaluación del prototipo de fogones para el uso eficiente de las biomásas destinadas a la cocción de alimentos*. (Tesis de Grado), Universidad de Cienfuegos Carlos Rafael Rodríguez, Cienfuegos, Cuba.
- Mencia, V. (2011). *Metodología para el diseño de tecnologías de combustión de biomásas en pila de capa gruesa con gasificadores, empleando la*

Multitubularidad Natural o Provocada. (Tesis de Maestría) Universidad de Cienfuegos Carlos Rafael Rodríguez, Cienfuegos, Cuba.

Rodríguez Arias, E. Abelardo Daniel, A. (2000). *Teoría y Práctica de los Procesos de Combustión.* Villa Clara, Cuba: *Editorial academia.*

Anexos.

Anexo 1 Cilindro exterior de acero con aislamiento térmico.
Fuente: Elaboración Propia.



Anexo 2 Hornilla con el emisor de los gases.
Fuente: Elaboración Propia.



Anexo 3 Cilindro interior con gasificadores y malla.
Fuente: Elaboración Propia.



Anexo 4 Combustión Eficiente en la hornilla.
Fuente: Elaboración Propia.



Anexo 5 Funcionamiento de la hornilla.
Fuente: Elaboración Propia.

