

UNIVERSIDAD DE CIENFUEGOS
Facultad de Ingeniería
Ingeniería Mecánica



Trabajo de Diploma

Título: *Diseño y construcción de prototipo de hornilla eficiente con el principio de la multitubularidad*

Autor: *Yordiel Enrique Melián*

Tutor: *Dr. Pedro Fundora Beltrán*

Curso 2014-2015

DECLARACION DE AUTORIDAD
UNIVERSIDAD DE CIENFUEGOS



Sistema de Documentación y Proyecto.

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

Firma del autor.

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

Información Científico Técnico
Nombre y Apellidos. Firma.

Vice Decano.	Firma del Tutor
Nombre y Apellidos. Firma.	Nombre y Apellidos. Firma.

Sistema de Documentación y Proyecto.
Nombre y Apellidos. Fir

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 el diseño de una hornilla eficiente de barro cocido, utilizando el principio de la multitubularidad. Inicialmente se hace una evaluación 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 el diseño de cualquier tecnología. La evaluación precedente junto con otros trabajos de investigación realizados con anterioridad, permitieron utilizar la metodología de diseño de fogones gasificadores de biomasas, utilizando el principio de la multitubularidad natural o provocada, en la combustión de lecho fijo de capa gruesa. Para el diseño de la hornilla eficiente, se parte del modelo físico matemático de comportamiento de la pérdida de masa en el tiempo, de las briquetas tubulares y multitubulares en combustión, fuera de una cámara con registro de la masa por unidad de tiempo. Se diseña la hornilla, mediante un ejemplo de cálculo, y se expone en los anexos, los planos de conjuntos y de piezas para la construcción de dicha tecnología.

Palabras claves:

Fogón, multitubularidad, combustión, combustibles, biomasas, diseño.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO I: FUNDAMENTO DEL PROCESO DE COMBUSTION Y GASIFICACION DE LOS COMBUSTIBLES SOLIDOS.	4
1.1 - RESEÑA HISTÓRICA DE LOS COMBUSTIBLES SÓLIDOS.	4
1.2: LA BIOMASA COMO FUENTE DE ENERGÍA.....	5
1.2.1: - Clasificación de los recursos de bioenergía.	6
1.2.2.-Utilización de la biomasa.	8
1.3.- PROCESOS DE CONVERSIÓN DE LA BIOMASA EN ENERGÍA.	10
1.3.1.-Métodos Termoquímicos.....	10
1.3.2.-Métodos Biológicos.	11
1.3.3.- Aplicaciones.	12
1.4: PROCESO DE COMBUSTIÓN DE LOS COMBUSTIBLES SÓLIDOS.	14
A nivel mundial se utilizan los combustibles orgánicos y combustibles nucleares.	15
1.5: VARIANTES DE DISEÑO DE ESTUFAS Y SUS CARACTERÍSTICAS.....	16
1.5.1 - Estufa NavivotiChulha.	16
1.5.2 - Estufa mejorada para la calefacción y cocción de alimentos, de procedencia Paquistaní.	17
1.5.3 - Estufa Institucional USIKA.	18
1.5.4 - Estufa Justa.....	18
1.6: CARACTERIZACION DE LOS COMBUSTIBLES SOLIDOS PARA SU EMPLEO EN EL PROTOTIPO DE ESTUFA EFICIENTE.....	19
1.6.1: La leña como combustible.....	19
1.6.2: Las briquetas combustibles.	20
1.6.3. Biomosas sin densificar (a granel).	20
1.7: GASIFICACIÓN.....	21
1.7.1: Diferencia entre gasificación y combustión.	22
1.7.2: Gasificador.	22
1.7.3: Proceso de gasificación.	22
1.7.4: Termoquímica del proceso de gasificación.	23
1.7.5: Tipos de gasificadores.....	25
1.8 - FOGONES EFICIENTES.	26
1.8.1 - Fogón de leña modelo “ Doña Justa”	27
1.8.2 - Fogón para leña J.P.V.C.	27
1.8.3: Fogón recuperativo para biomosas P.F.B.A.	28
1.8.4: Principio de funcionamiento del Fogón- Gasificador.....	28
Conclusiones parciales Capítulo I:	30
CAPÍTULO II.....	31
METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO DE FOGONES GASIFICADORES DE BIOMASAS, UTILIZANDO EL PRINCIPIO DE LA MULTITUBULARIDAD NATURAL O PROVOCADA. (González. O. 2011).	31
2.1- INTRODUCCIÓN.	31

2.2- LA MULTITUBULARIDAD Y LA EFECTIVIDAD DE LA COMBUSTIÓN DE LOS COMBUSTIBLES SÓLIDOS.....	32
2.3- ÍNDICE DE TRANSFORMACIÓN DE LAS BIOMASAS O GRADO DE TRANSFORMACIÓN DE LAS BIOMASAS EN BIOGÁS, DURANTE EL PROCESO DE GASIFICACIÓN. (González O. 2011)33	
2.3.1 Gasificación de las biomosas en la combustión en lecho fijo de capa gruesa con multitubularidad provocada.	33
2.3.2 Determinación del índice de transformación de las biomosas en el proceso de gasificación (ψ). (González O. 2011)	34
2.4- DIMENSIONADOPRELIMINAR DE UNA CÁMARA DE COMBUSTIÓN CON SUS DISPOSITIVOS DE GASIFICACIÓN-COMBUSTIÓN.	46
2.4.1 - Dimensionamiento de la Cámara de Combustión.	46
2.4.2 - Forma geométrica de la Cámara de Combustión.	46
2.4.3 - Metodología para el dimensionado de la cámara de combustión y dispositivos de gasificación.	50
Conclusiones Parciales Capítulo II.	51
CAPITULO III.....	52
3.1 - DISEÑO DE HORNILLA EFICIENTE, UTILIZANDO EL PRINCIPIO DE LA MULTITUBULARIDAD.	52
3.1.1 - Principio de la multitubularidad.	52
3.2 – FACILIDADES DE LA HORNILLA DISEÑADA.	59
3.3 – ESTRUCTURA Y FUNCIONAMIENTO DE LA HORNILLA EFICIENTE (HPFB: 00 - 00 - PE).	60
3.3.1 – Estructura dela hornilla eficiente (HPFB: 00 – 00 – PE).	60
3.3.2 – FUNCIONAMIENTO DE LA HORNILLA EFICIENTE.	62
Conclusiones Parciales Capítulo III.....	64
CONCLUSIONES GENERALES.....	65
RECOMENDACIONES.	66
BIBLIOGRAFÍA	
ANEXOS	

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:

No existe referencia bibliográfica que declare explícitamente la utilización del principio de la multitubularidad en el diseño de hornillas eficientes de materiales de bajo costo (arcilla), para la cocción de alimentos.

Hipótesis:

Con el diseño y construcción de la hornilla eficiente, utilizando el principio de la multitubularidad, se asegura un aprovechamiento racional del combustible sólido (Biomosas), y constituye una alternativa estratégica en situaciones extremas con bajo índice de impacto medio ambiental.

Objetivo general:

Diseñar y construir una hornilla eficiente, utilizando el principio de la multitubularidad, para la gasificación y combustión de biomosas,

Objetivos específicos:

- 1) Revisar y resumir la bibliografía referente a las biomosas y a sus potencialidades como combustibles y a los diferentes diseños de Fogones para cocción de alimento en general, buscando los elementos de semejanza o diferencias.
- 2) Aplicar la metodología del principio de multitubularidad para briquetas tubulares y multitubulares y para pilas de combustibles sin densificar, con multitubularidad provocada

- 3) Diseñar hornilla eficiente de barro cocido con el empleo de gasificadores, para la multitubularidad con potencia térmica inferior a 5 kW
- 4) Determinar el costo preliminar de la hornilla eficiente diseñada y construida.

CAPÍTULO I: FUNDAMENTO DEL PROCESO DE COMBUSTION Y GASIFICACION DE LOS COMBUSTIBLES SOLIDOS.

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 estufas 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 estufas modernas ganan más puntos que cualquier fuego abierto, aunque estos se realicen bien. Una buena estufa 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, Y., 2008).

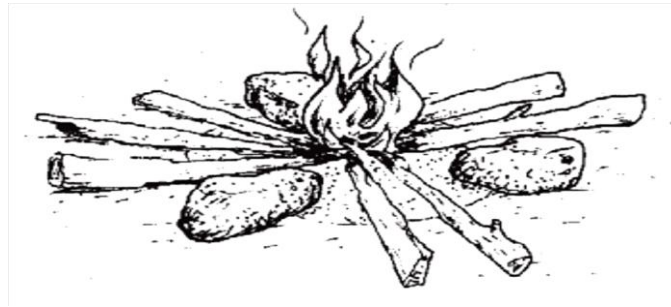


Fig.1.1 Fuego abierto tradicional.

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.

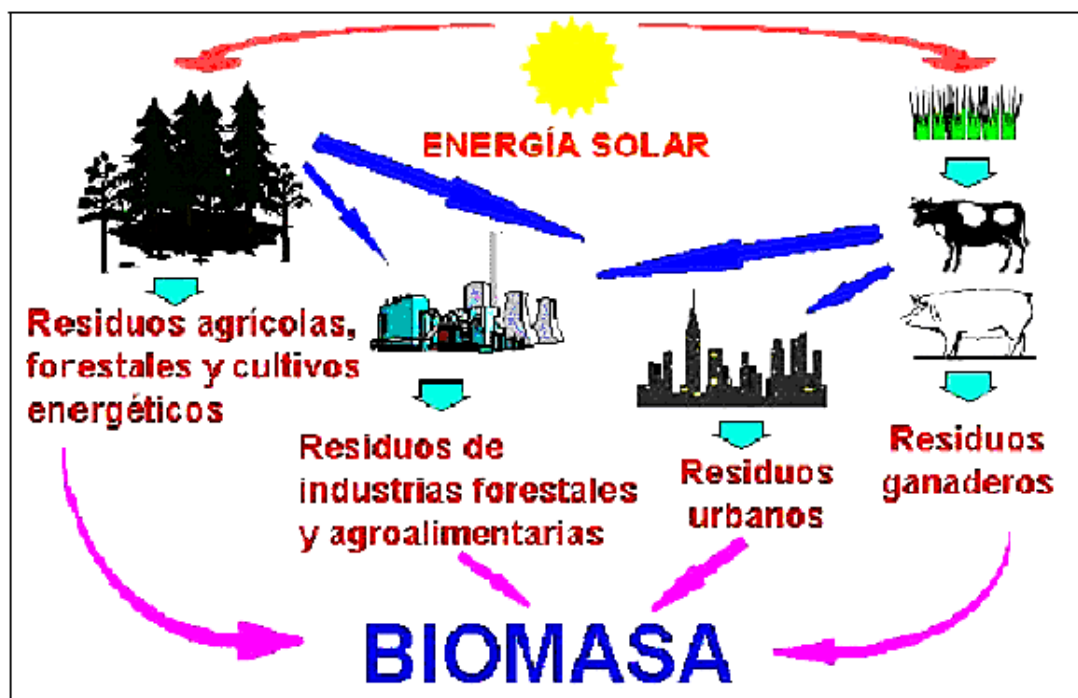


Fig.1.2: Esquema de obtención de biomasa.

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. Esta suple, 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, O., 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, O., 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 sobre fertilización 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, O., 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 diesel, 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, V., 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, V., 2011)

1.3.3.- Aplicaciones.

La gran variedad de biomásas existentes unida al desarrollo de distintas tecnologías de transformación de ésta en energía (Combustión directa, Pirolisis, Gasificación, Fermentación, Digestión anaeróbica,...) permiten plantear una gran cantidad de posibles aplicaciones entre las que 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 diesel o de turbinas de gas para quemar el gas producido, puede elevar el rendimiento a valores por encima del 30%, sin embargo, ésta es una opción poco extendida.

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 estos utilizados para la generación de electricidad.

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

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 Hourrutiner, V., 2011).

1.4: PROCESO DE COMBUSTIÓN DE LOS COMBUSTIBLES SÓLIDOS.

Combustión: Es la reacción 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).

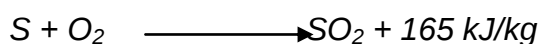
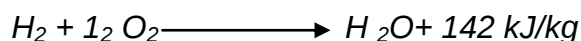
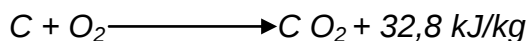
Artificiales: Gasolina, queroseno, gas oíl, fuel oíl.

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 ESTUFAS Y SUS CARACTERÍSTICAS.

1.5.1 - Estufa NavivotiChulha.

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 estufa de 2 kW de potencia térmica se estima un costo de 3 USD. La eficiencia de la tecnología alcanza el 34%.

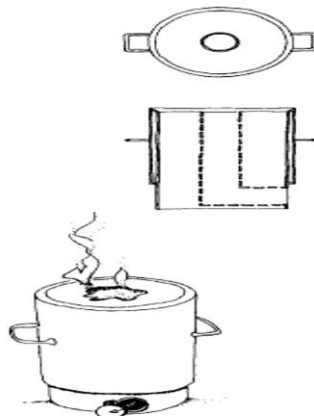


Fig.1.2 Estufa NavivotiChulha.

1.5.2 - Estufa 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 estufa cerrada y dejando escapar los gases quemados por una corta chimenea en la parte superior.

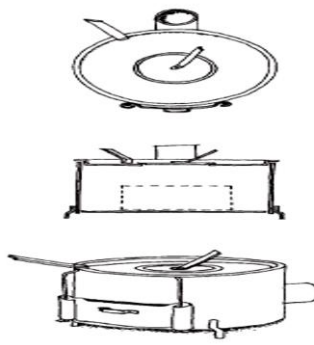


Fig.1.3 Estufa Mejorada Paquistaní.

1.5.3 - Estufa Institucional USIKA.

Es una estufa 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.

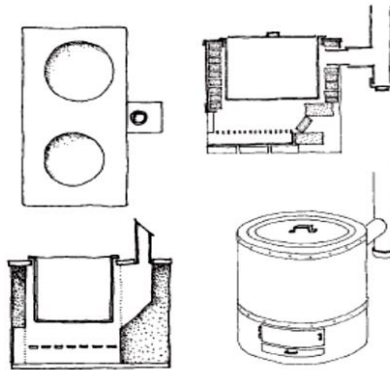


Fig.1.4 Estufa Institucional USIKA.

1.5.4 - Estufa Justa.

El armazón de una estufa 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.

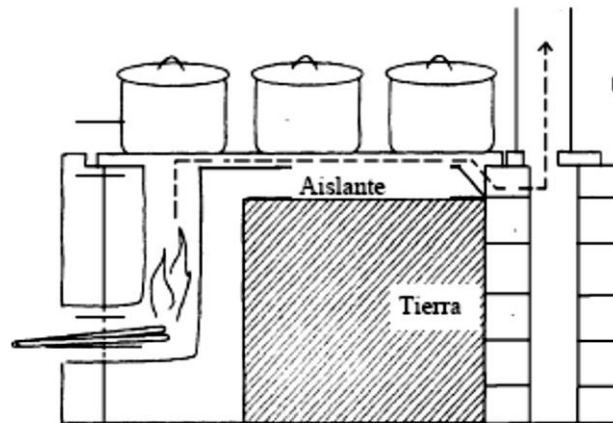


Fig.1.5 Estufa Justa.

1.6: CARACTERIZACION DE LOS COMBUSTIBLES SOLIDOS PARA SU EMPLEO EN EL PROTOTIPO DE ESTUFA 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 estufa 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, V., 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, V., 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/m^3 , 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 desprestigiar 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.

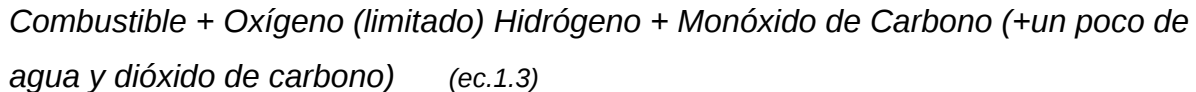
1.7.1: Diferencia entre gasificación y combustión.

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:

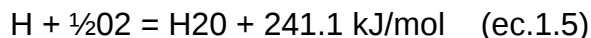
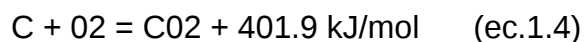
1) Pirolisis o descomposición térmica: Es la etapa en la que, mediante calor y en ausencia de oxígeno suficiente, el combustible se descompone en una mezcla de sólido, líquido y gas. Al sólido originado en esta etapa se le conoce como “char” y a los líquidos, debido a la presencia de alquitranes y vapores 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.

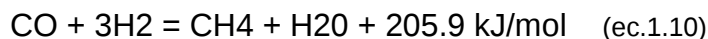
Las etapas de oxidación y reducción pueden considerarse conjuntamente en una sola etapa de gasificación, en la que tienen lugar todo tipo de reacciones posibles entre el char y la mezcla gaseosa presente.

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:

$$kW = \frac{[\text{CO}] * [\text{H}_2\text{O}]}{[\text{CO}_2] * [\text{H}_2]} \quad (\text{ec.1.11})$$

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).

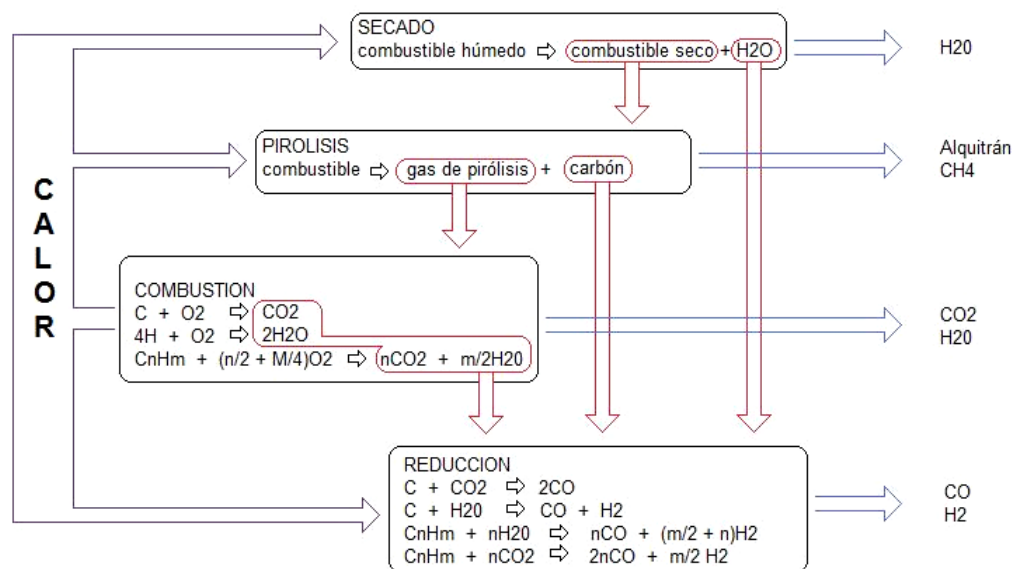


Figura 1.6 Etapas de la gasificación.

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

De cama fluidizada: En donde el combustible viaja dentro del gasificador junto con el agente de oxidación, el cual reacciona con las partículas de biomasa mientras se 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, O., 2011).

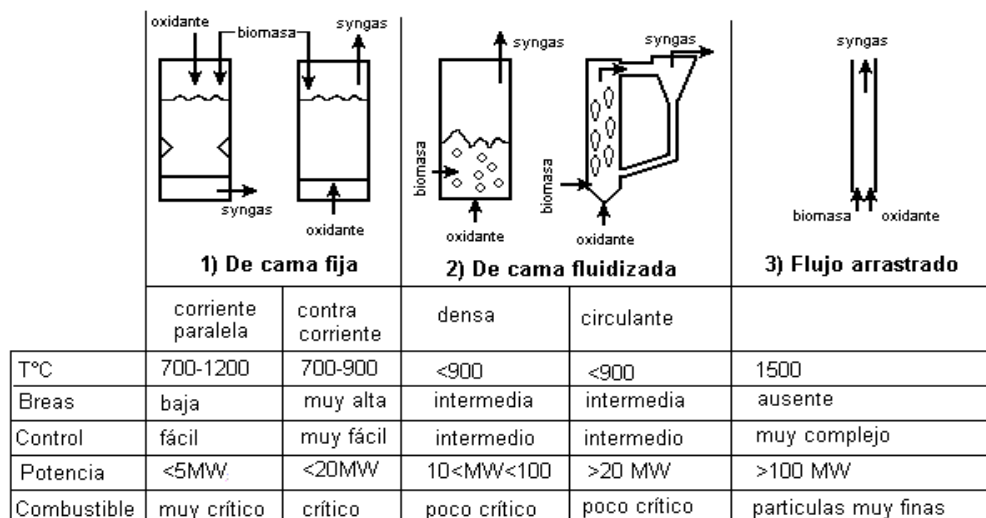


Figura 1.7 Cuadro comparativo entre los distintos tipos de gasificadores.

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 Oregón, 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 50 cm 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 biomasas.

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, los niveles 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 biomasas 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 biomasas 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 biomasas 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 producido 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, Oriel, 2011).

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 estufas 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 estufas 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 de la gasificación de la biomasa.

CAPÍTULO II

METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO DE FOGONES GASIFICADORES DE BIOMASAS, UTILIZANDO EL PRINCIPIO DE LA MULTITUBULARIDAD NATURAL O PROVOCADA. (González. O. , 2011)

2.1- INTRODUCCIÓN.

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

otros como macro multitubularidad, este último es esencial para un efectivo y productivo proceso de gasificación, provocarlo en una aplicación es la garantía de simplificar y abaratar las tecnologías para el empleo racional y eficiente de las biomásas.

2.2- LA MULTITUBULARIDAD Y LA EFECTIVIDAD DE LA COMBUSTIÓN DE LOS COMBUSTIBLES SÓLIDOS.

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

Todos los factores vinculados a un combustible sólido que aseguren la inflamación del mismo en el mínimo tiempo posible, con independencia de las condiciones de combustión, con elevada potencia y energía térmica, contribuyen a caracterizarlo desde el punto de vista de su calidad como tal, será de peor calidad, el que no satisfaga estos requisitos. Cuando se utiliza en una aplicación combustible de baja calidad, desde el punto de vista de la combustión, ello presupone gastos adicionales en la preparación del mismo y en la tecnología de combustión, para asegurar una combustión con aceptables índices. Los experimentos con biomásas residuales leñosas y no leñosas densificadas en forma de briquetas tubulares y multitubulares, en la combustión en pila de capa gruesa (Fundora, I., 2009); (Infante, C., 2010), demostraron, que la macro multitubularidad es la garantía de la gasificación de dichos combustibles sólidos, con independencia de las dimensiones geométricas y de la

densidad. Para la valoración cualitativa de un combustible sólido, se consideró tomar en cuenta la magnitud de los siguientes factores de respuesta, en las diferentes fases de la combustión, tal es: El tiempo de ignición o de inicio de la inflamación del combustible (tig), índice de combustión promedio (ICP) o velocidad media de la reacción de combustión, velocidad específica de la reacción de combustión (k) o reactividad específica. Las condiciones para la determinación de los factores precedentes; briquetas individuales, en combustión fuera de una cámara de combustión y con registro de la pérdida de masa en la unidad de tiempo. Los factores, potencia térmica aportada por el combustible (N_b) y la eficiencia del sistema de combustión (η_{sc}), fueron determinados en un horno de combustión en pila con una masa determinada de briquetas y por consiguiente, en un número, en correspondencia con la masa y la densidad exigida en el experimento, que colocadas convenientemente en la cámara de combustión de la instalación, hacen el equivalente a una gran briqueta multitubular, independientemente de las características individuales de las briquetas investigadas.

2.3- ÍNDICE DE TRANSFORMACIÓN DE LAS BIOMASAS O GRADO DE TRANSFORMACIÓN DE LAS BIOMASAS EN BIOGÁS, DURANTE EL PROCESO DE GASIFICACIÓN. (González O. 2011)

2.3.1 Gasificación de las biomاسas en la combustión en lecho fijo de capa gruesa con multitubularidad provocada.

En estudios precedentes (Fundora, I.,2009); (Infante, C.,2010), se demostró experimentalmente que la esencia del proceso de gasificación quedaba determinada por la multitubularidad de la masa del combustible en el interior de una cámara de combustión, y como factor determinante en el comportamiento de los índices fundamentales, resultó la relación equivalente de diámetros (λ_{eq}), este factor representa la multitubularidad, por cuanto en el volumen de combustible sólido, existirá un conveniente número de conductos de dimensiones medibles o no, que satisfagan la magnitud del factor (λ_{eq}), nunca inferior al 30% y ello asegura que la distancia relativa entre los mismos ($\beta < 2$), posibiliten un proceso de gasificación espontáneo y semejante al que ocurre en la naturaleza, para este propósito, se debe provocar la multitubularidad, ya sea por la organización del combustible sólido en la

pila dentro de la cámara de combustión (Leña, carbón, briquetas macizas o multitubulares) o por la creación artificial de dispositivos de gasificación, que conectados con la parrilla del combustible, aseguran la multitubularidad deseada (combustibles sin densificar con cualquier grado de granulometría). Es importante señalar, que los dispositivos de gasificación o gasificadores, constituyen la opción más integral y generalizadora de formación de una tecnología para la gasificación-combustión de cualquiera de los estados en que se encuentren las biomásas, con elevados valores de los índices fundamentales de combustión.

2.3.2 Determinación del índice de transformación de las biomásas en el proceso de gasificación (ψ). (González O., 2011)

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

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

Donde:

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

$w_0 \Rightarrow$

Masa inicial de la briqueta antes de la combustión, (g).

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

La Figura 2.1 Muestra la característica de comportamiento de la masa de una briqueta

multitubular de aserrín de madera de $(\frac{d}{D}^{eq} = 0.5)$ y 12% de humedad.

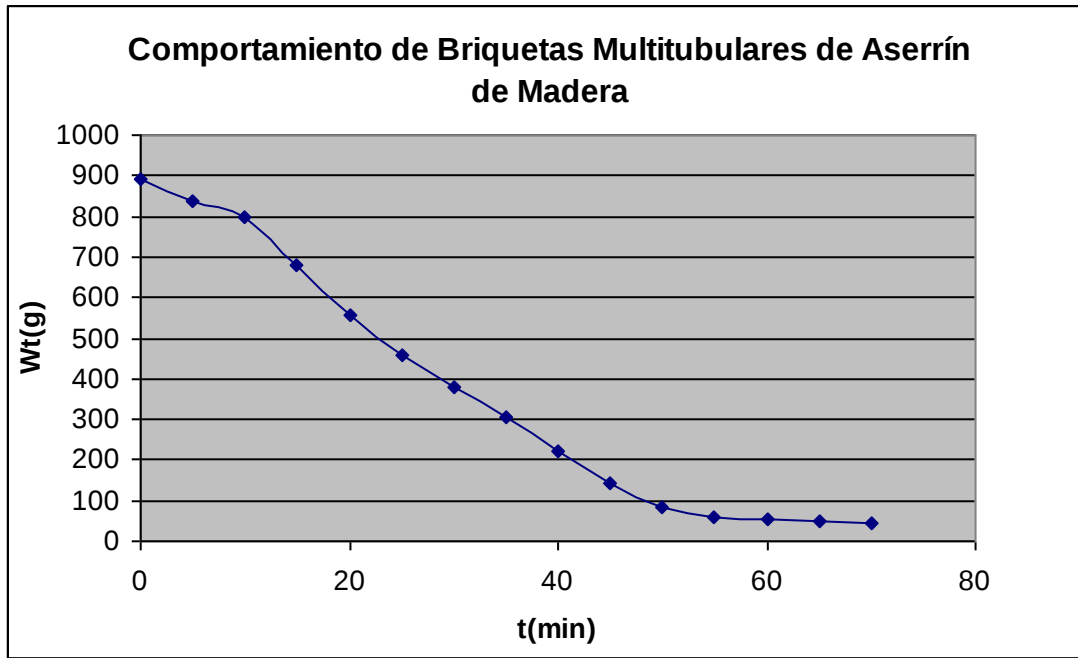


Fig. 2.1 Característica de comportamiento de la briqueta multitubular de aserrín de madera con 12% de humedad, densidad, $\rho=550 \text{ kg/m}^3$, diámetro exterior $D=100\text{mm}$ y masa $w_0= 890\text{g}$.

La característica de comportamiento mostrada en la figura 2.1 puede ser representada por un modelo físico matemático de la forma siguiente:

$$w_t = b_0 + b_1 \cdot e^{-c_1 \cdot t} \quad (\text{ec.2.2})$$

Donde:

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

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

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

$t \Rightarrow$ Tiempo, (min).

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

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

Equivalente a la ecuación lineal.

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

Donde:

$$A = L_n b_1$$

$$B = -c_1$$

Derivando la ecuación (2.2).

$$w_t = b_0 + b_1 \cdot e^{-c_1 t}$$

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

Donde:

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

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

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

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

$T_2 \Rightarrow$ Se obtiene de la ecuación (2.4) y de los experimentos realizados por (Fundora I. 2009) donde se considera que valores de $v_g \leq 3 \text{ g/min}$, finaliza la combustión con llamas y el aporte energético del carbón libre de las briquetas no tiene importancia energética.

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

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

Linealizando la ecuación (2.6)

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

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

$$|\Delta w| = \int_5^{c_1} -b_1 \cdot c_1 \cdot e^{-c_1 \cdot t} \cdot dt$$

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

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

De la evaluación de la ecuación (2.3) para diferentes valores de (w_t) y del tiempo (t) se obtienen los valores de (c_1) para briquetas de diferentes relaciones de diámetros $\left(\frac{d}{D}^{eq}\right)$ y diferentes biomásas.

En la tabla 2.1 se exponen los valores de c_1 para diferentes relaciones $\left(\frac{d}{D}eq\right)$.

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

Utilizando regresión lineal simple.

$$c_{1PajaCaña} = -0.0033 + 0.13 \cdot \frac{d}{D}eq$$

$$c_{1CáscaraCafé} = 0.016 + 0.11 \cdot \frac{d}{D}eq$$

$$c_{1AserrínMadera} = 0.017 + 0.125 \cdot \frac{d}{D}eq$$

En la tabla 2.2 se muestran los valores de ψ para briquetas de biomosas con $\frac{d}{D}eq = (0.3; 0.5)$ y una masa inicial $w_0=1000g$.

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

Si en el proceso de combustión-gasificación se utiliza leña, briquetas macizas o tubulares, como combustible, es importante determinar $\frac{d}{D}^{eq}$ y dependiendo del tipo de biomasa, utilizar la ecuación de c_1 correspondiente; (En el caso de la leña se puede

emplear la ecuación de c_1 que caracteriza al aserrín de madera con, $\frac{d}{D}^{eq} \approx \frac{A_{gasif}}{A_{parrilla}}$).

Donde:

$A_{gasif} \Rightarrow$ Área de Gasificación, (m^2).

$A_{parrilla} \Rightarrow$ Área de la Parrilla, (m^2).

$$A_{gasif} = \frac{V_{gasif}}{H}, (m^2) \quad (ec.2.10)$$

Donde:

$V_{gasif} \Rightarrow$ Constituye el volumen de los espacios vacíos en la cámara de combustión, (m^3).

$H \Rightarrow$ Altura útil de la cámara de combustión, (m).

Ecuación para leña y briquetas macizas.

$$V_{gasif_1} = V_{cámara} - V_{comb.} \quad (ec.2.11)$$

Donde:

$V_{cámara} \Rightarrow$ Volumen potencial efectivo de la cámara de combustión, (m^3).

$$V_{comb.} = \frac{w_{comb}}{\rho_{comb}}$$

Donde

$V_{comb} \Rightarrow$ Volumen aparente del combustible sólido, (m^3).

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

$\rho_{comb} \Rightarrow$ Densidad del combustible, (kg/m^3).

Determinación del área perimetral para el cálculo del (ICP) para la leña en trozos como combustible.

$$A_{gasif.Perimetral} = \sqrt{\frac{4 \cdot A_{gasif}}{\pi} \cdot \pi \cdot H_{cámara}}, (m^2) \quad (ec.2.12)$$

Donde:

$A_{gasif} \Rightarrow$ Se obtiene de la ecuación (2.10).

Ecuación para el caso de briquetas tubulares y multitubulares en la cámara de combustión.

$$V_{gasif_2} = \left(V_{cámara} - V_{comb.} \right) \cdot V_{cond.}, (m^3) \quad (ec.2.13)$$

El término $V_{cond.}$ representa el volumen medio de los conductos de las briquetas.

$$V_{cond.} = \frac{d}{D} eq_{briq} \cdot V_{comb.}, (m^3) \quad (ec.2.14)$$

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

$$A_{gasif.perim} = \pi \cdot D \cdot z \cdot H, (m^2) \quad (ec.2.15)$$

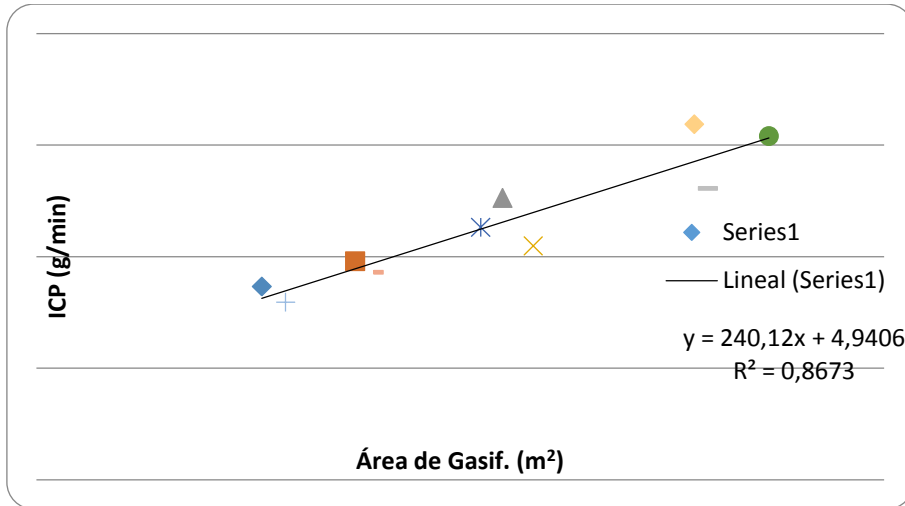
Donde:

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

$z \Rightarrow$ Número de gasificadores.

$H \Rightarrow$ Altura efectiva de los gasificadores, (m).

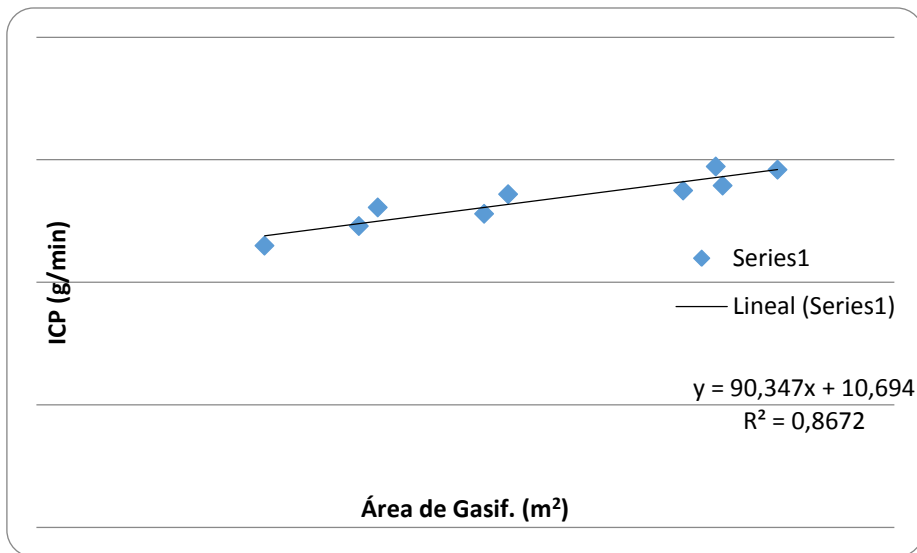
En la figura 2.2 Se muestra el experimento realizado con cáscara de café, con briquetas multitubulares (Infante C.), se denota una correspondencia lineal entre el índice de combustión promedio (ICP) y el área perimetral del gasificador (A_{gasif}).



La figura 2.2 Muestra la característica de comportamiento entre el ICP y el A_{prim} del gasificador.

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

En la figura 2.3 Se muestra el experimento realizado con aserrín de madera, con briquetas multitubulares (Infante C.), se denota una correspondencia lineal entre el índice de combustión promedio (ICP) y el área perimetral del gasificador (A_{gasif}).



La figura 2.3 Muestra la característica de comportamiento entre el ICP y el A_{perim} del gasificador.

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

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

$$|\Delta w| = \psi \cdot w_{total} \quad , (g) \quad (ec.2.16)$$

$$ICP = \frac{|\Delta w|}{\Delta t} = \frac{\psi \cdot w_{total}}{\Delta t} \quad (ec.2.17)$$

$$\Delta t = t_2 - t_1$$

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

Donde:

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

$$b_1 = w_t - b_0$$

Determinación de la energía del proceso de gasificación.

$$E_{gasif} = V_g \cdot \psi \cdot w_{total} \quad , (kJ) \quad (ec.2.18)$$

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.

$$V_g = 5.6 \frac{Mj}{m^3} = 5600 \frac{kJ}{m^3} = 3733 \frac{kJ}{kg}$$

Potencia térmica del proceso de gasificación.

$$N_{gasif} = 0.06 \cdot V_g \cdot ICP \quad , (kJ/h) \quad (ec.2.19)$$

$$N_{gasif} = 1.66 \cdot 10^{-5} \cdot V_g \cdot ICP \quad , (kW) \quad (ec.2.20)$$

Donde:

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

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

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

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

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

$A_{gasif.perim} = z_1 \cdot \pi \cdot d_{gasif} \cdot H_{gasif} \Rightarrow$ Área de gasificación perimetral del gasificador, (m²).

Donde:

$z_1 \Rightarrow$ Número de gasificadores.

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

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

Despejando la ecuación (2.19).

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

Donde:

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

Despejando la ecuación (2.20).

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

Donde:

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

Para biomásas no leñosas (Cáscara de Café).

$$A_{\text{gasif. perim}} = \frac{ICP - 10.69}{90.31}, (\text{m}^2)$$

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

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

Y se dispone del diámetro de la cámara de combustión.

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

Como el área de gasificación perimetral.

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

$$\pi \cdot z_1 \cdot d \cdot H_{\text{gasif}} = \frac{ICP - 10.69}{90.31}$$

$$\pi \cdot \left(\frac{d}{D}eq\right)^2 \cdot D \cdot H_{\text{gasif}} = \frac{ICP - 10.69}{90.31}$$

$$H_{\text{gasif}} = \frac{ICP - 10.69}{90.31 \cdot \left[\pi \cdot \left(\frac{d}{D}eq\right)^2 \cdot D \right]}, (\text{m})$$

Volviendo al área de gasificación perimetral inicial.

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

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

Si se considera que la altura H_{gasif} resulta muy elevada para sus propósitos,

dimensionarla a sus necesidades y ajuste la correlación ($z_1 \cdot d$) de la ecuación precedente.

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

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

A partir de la ecuación (2.18).

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

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

Donde:

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

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

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

$$V_{ef} = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \left[1 - z_1 \left(\frac{d}{D} \right)^2 \right] \cdot H_{gasif} \text{ (ec.2.22)}$$

Sustituyendo en la ecuación (2.18).

$$E_{gasif} = 0.785 \cdot V_g \cdot \psi \cdot H_{gasif} \cdot \rho_0 \cdot D^2 \left[1 - z_1 \left(\frac{d}{D} \right)^2 \right]$$

Donde:

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

$z_1 \Rightarrow$ Número de gasificadores.

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

$\psi \Rightarrow$ Coeficiente de transformación.

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

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

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

Experimentos realizados por (Infante C., 2010) sobre la relación del área de alimentación de aire secundario, respecto al área de los gasificadores demostraron que a partir de $\delta = 0.85$ el proceso de gasificación- combustión de los gases no tuvo dificultades; sin embargo, el aseguramiento incondicional del proceso de gasificación se logró con estrangulación del aire de alimentación en una magnitud inferior al 20%, lo que corresponde a reducir la sección del conducto en esa magnitud, para las condiciones del fogón objeto de experimento.

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

2.4- DIMENSIONADO PRELIMINAR DE UNA CÁMARA DE COMBUSTIÓN CON SUS DISPOSITIVOS DE GASIFICACIÓN-COMBUSTIÓN.

2.4.1 - Dimensionamiento de la Cámara de Combustión.

- a) En función de las dimensiones máximas de las ollas que se utilicen (Si se hace hendida).
- b) En función de la potencia térmica requerida en la aplicación.
- c) Según la eficiencia térmica que se desee obtener en la misma.

2.4.2 - Forma geométrica de la Cámara de Combustión.

- 1. Prismática.
- 2. Cilíndrica.

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

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

Los resultados de las investigaciones experimentales (Infante, C., 2010.) muestran los rangos más aceptables de las relaciones entre el aire secundario y los gases combustibles (referirse a la ecuación 2.23).

Si $\delta=1$ presupone que $A_{\text{secund.}}=A_{\text{gasif.}}$ y el área por donde debe circular el aire de

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

Resultados de investigaciones experimentales precedentes (Fundora I, 2009, Fundora P 2003) demostraron en briquetas tubulares y multitubulares que la relación entre el área de gasificación (A_{gasif}) y el área de la sección exterior de la briqueta ($A_{\text{cám}}$),

$$\lambda_{eq} = \frac{A_{\text{gasif}}}{A_{\text{cám}}} = 0.3:0.7$$

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

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

$$\lambda_{eq} = \frac{A_{\text{gasif}}}{A_{\text{cám}}}$$

relación, y ello dependerá de la elección de una u otra de las magnitudes (A_{gasif} o $A_{\text{cám}}$) y la altura de la cámara tiene que tomar en consideración la profundidad que se quiere introducir la olla (Olla hendida si se opta por esta alternativa) y la

garantía de una altura sobre el combustible superior al 60% de la altura correspondiente al combustible, para asegurar la combustión de los gases.

$$H_{cám} = H_{comb} + H_{vacío} + H_{olla} \text{ (ec.2.24)}$$

$$H_{comb} + H_{vacío} \geq 1.6 \cdot H_{comb}$$

Donde:

$H_{comb} \Rightarrow$ Altura que ocupa el combustible, (m).

$H_{cám} \Rightarrow$ Altura total de la cámara, (m).

$H_{vacío} \Rightarrow$ Altura vacía sobre el combustible y por debajo de la olla, (m).

$H_{olla} \Rightarrow$ Profundidad que penetra la olla, (m).

Cuando se utiliza la hornilla plana, la altura de la olla no se considera en la expresión y en estas condiciones se puede incrementar la altura vacía ($H_{vacío}$).

En esta alternativa el área del conducto de alimentación de aire primario debe ser inferior al 20% del área de gasificación y debe preverse la posibilidad de la regulación por estrangulación del flujo.

$$A_{gasif} = 0.3 : 0.7 A_{cám} \text{ (ec.2.25)}$$

$$A_{cond} \leq 0.20 \cdot A_{gasif} \text{ (ec.2.26)}$$

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

$$\delta = \frac{A_{secund}}{A_{gasif}} = 0.85 : 2 \quad \text{y la relación} \quad \lambda_{eq} = \frac{A_{gasif}}{A_{cám}} = 0.3 : 0.7$$

En las figuras 2.4 y 2.5, se muestran distintos tipos de gasificadores.

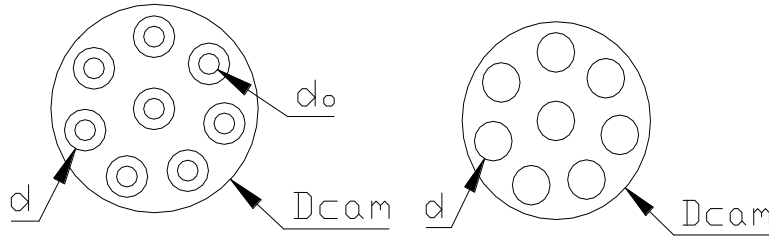


Figura 2.4 Figura 2.5

Para la figura (2.4), se utiliza la siguiente ecuación.

$$A_t = A_{gasif} + A_{secund} \quad (ec.2.27)$$

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

Para el caso de la figura (2.5) se utiliza la siguiente ecuación.

$$A_t = A_{gasif} = \frac{z \cdot \pi \cdot d^2}{4}, (m^2) \quad (ec.2.28)$$

Donde:

$d \Rightarrow$ Diámetro del conducto de gasificación.

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

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

$$A_{cám} = \frac{\pi \cdot D_{cám}^2}{4}, (m^2) \quad (ec.2.29)$$

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

$$A_{cám} = L \cdot A, (m^2) \quad (ec.2.30)$$

La variante (fig.2.4) se corresponde con la alternativa que se analiza. Esta alternativa es básicamente para la utilización de combustibles sin densificar (aserrín de madera, hojas, cáscara de arroz, cáscara de café, bagazo de caña, etc.) con gasificadores (multitubularidad provocada). Si en estas condiciones se utiliza leña en trozos o briquetas de cualquier característica, los gasificadores y conductos de aire secundario

son favorables al incremento del aire secundario en cualquiera de las variantes utilizadas y el área de gasificación se debe determinar con la organización de estos combustibles en los espacios dejados por estos conductos y el área total de la cámara

de combustión. Ello presupone valores elevados de $\lambda = \frac{A_t}{A_{comb}}$ y $\delta = \frac{A_{secund}}{A_{gasif}}$.

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

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

- 1- Elección de las dimensiones de la cámara de combustión según las dimensiones de la olla.

- a) Profundidad de la olla en la cámara (hornilla hendida).
- b) Hornilla plana.

$$\lambda_{eq} = \frac{A_{gasif}}{A_{cám}} = 0.3:0.7 \quad y \quad \delta = \frac{A_{secund}}{A_{gasif}} = 0.85:2$$

- 2- Elección de los coeficientes
- 3- Elegir el número de gasificadores (z_1) y de su diámetro (d), según el área de gasificación (A_{gasif}), preliminarmente asumir $\delta=1$ donde $A_{gasif}=A_{secund}$.
- 4- Elegir el número (z_2) de conductos de aire secundario y su diámetro (d_0), a partir del área de aire secundario (A_{secund}).
- 5- La altura de la cámara de combustión debe ser determinada a partir de la masa media de combustible, la altura requerida para la combustión de los gases combustibles, y la profundidad de penetración de la olla.

$$H_{comb} = \frac{V_{comb}}{A_{cám}} \quad H_{cám} = H_{comb} + H_{vacío} + H_{olla}$$

$$V_{comb} = \frac{w_{comb}}{\rho_{comb}} \quad H_{cám} \geq 1.6 \cdot H_{comb} + H_{olla}$$

$$H_{vacío} \geq 0.6 \cdot H_{comb}$$

- 6- La altura de los gasificadores debe ser igual o superior a la altura del combustible.
- 7- El área del conducto de aire de alimentación debe ser igual o inferior al 20% del área total de circulación de aire en la cámara de combustión (A_t).

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

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

Conclusiones parciales capítulo II

- 1-El modelo teórico experimental del proceso de gasificación, constituye una herramienta útil para conocer el comportamiento del potencial de biogás generado, de una masa de combustible determinada, pero las condiciones del experimento difieren de las condiciones de combustión en cámaras cerradas.
- 2-Los resultados de los experimentos en cámaras de combustión cerradas muestran que los índices fundamentales de combustión tienen una estrecha relación con el área perimetral y con el número de gasificadores.
- 3- Si en el diseño de la tecnología de combustión, se utilizan los resultados del modelo teórico del proceso de gasificación, las potencialidades reales de la tecnología de combustión diseñada son superiores en todos los órdenes, ello presupone determinar realmente los índices fundamentales de combustión en el proceso de explotación de la misma.
- 4- Resulta de mucha importancia, el control del aire de alimentación y su posible distribución a los gasificadores y a los conductos de aire secundario, para la garantía del mínimo necesario en la gasificación y el suficiente secundario en la combustión.

CAPITULO III

3.1 - DISEÑO DE HORNILLA EFICIENTE, UTILIZANDO EL PRINCIPIO DE LA MULTITUBULARIDAD

3.1.1 - Principio de la multitubularidad

El diseño de la hornilla eficiente, con el principio de la multitubularidad, comienza por el conjunto que asegura el proceso de gasificación y combustión, es decir, el número y dimensión de los gasificadores y conductos de aire secundario, conjuntamente con la masa y el volumen del combustible, para una demanda determinada de energía y potencia calorífica deseada. Los demás factores involucrados son los responsables de la manipulación, aseguramiento del flujo de aire, gases y del grado de aprovechamiento del calor en sus diferentes manifestaciones (convección, conducción y radiación).

La parrilla con los gasificadores constituye la unidad ensamblada más importante en el aseguramiento del proceso de gasificación-combustión, de ahí la necesidad de

elegir convenientemente $\lambda = \frac{d}{D}eq$ y $\delta = \frac{A_{secund}}{A_{gasif}} = 0.85:2$.

Considerando:

- 1) $\delta = 1$; $z_1 = 6$; $d_0 = 40$ mm; $D = 220$ mm, Con un conducto de aire secundario en el centro, de del conjunto de gasificadores; $ds = 70$ mm

$$\lambda = \frac{d}{D}eq = \sqrt{z_1} \frac{d_0}{D} = 0,45$$

- 2) $\delta = 1$; $z_1 = 6$; $d_0 = 40$ mm; $D = 220$ mm sin conducto de aire secundario.

$$\lambda = \frac{d}{D}eq = \sqrt{z_1} \frac{d_0}{D} = 0,45$$

- 3) $\delta = 1$ $z_1 = 7$; $d_0 = 40$ mm; $D = 220$ mm

$$\lambda = \frac{d}{D}eq = \sqrt{z_1} \frac{d_0}{D} = 0,5$$

$$A_{gasif} = \frac{z_1 \cdot \pi \cdot d_0^2}{4}.$$

Las relaciones que aseguran la multitubularidad $\left(\lambda_{eq} = \frac{d}{D} eq\right)$ y el adecuado reparto del aire de alimentación $\left(\delta = \frac{A_{secund}}{A_{gasif}}\right)$ entre gasificadores y conductos de aire secundario.

$$\lambda_{eq} = 0.3 : 0.7 ; \delta = 0.85 : 2$$

$$0.3 \leq \lambda_{eq} \leq 0.7 ; 0.85 \leq \delta \leq 2$$

$$\lambda_{eq} = \frac{d}{D} eq = \sqrt{z_1} \cdot \frac{d_0}{D}$$

Donde:

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

$$3 \leq z_1 \leq 9$$

d_0 Diámetro interior del gasificador

3.1.2 - Ejemplo de cálculo.

1 - Asumir preliminarmente $z=6$, $d_0=40\text{mm}$, $D=220\text{mm}$, Determinar $\left(\delta = \frac{A_{secund}}{A_{gasif}}\right)$

$$A_{secund} = \frac{\pi \cdot d_{ss}^2}{4} \cdot z_2$$

Donde:

$d_s=0.07\text{m} \Rightarrow$ Diámetro del conducto de aire secundario (m).

$z_2=1 \Rightarrow$ Número de conductos de aire secundario.

$$A_{secund} = \frac{\pi \cdot 0.07^2}{4}$$

$$A_{secund} = 0,00385 \text{ m}^2$$

$$A_{gasif} = \frac{\pi \cdot d_0^2}{4} \cdot z_1$$

$$A_{gasif} = \frac{\pi \cdot 0.04^2}{4} \cdot 6$$

$$A_{gasif} = 0.00753 m^2$$

$$\delta_{calculado} = 0.51 < \delta_{mín} = 0.85$$

2 - Asumir $\delta = 1$

$$A_{secund} = A_{gasif}$$

$$A_{secund} = 0.00753 m^2$$

3 - Recalcular el número de conductos de aire secundario necesario con diámetro (d_s), partiendo del área diferencial.

$$A_{dif} = A_{gasif} - A_{secund} = 0.00753 - 0.00385$$

$$A_{dif} = 0.00368 m^2$$

Asumir $d_s = 20mm$

$$z_2 \cdot \frac{\pi \cdot d_s^2}{4} = A_{dif}$$

$$z_2 = \frac{4 \cdot A_{dif}}{\pi \cdot d_s^2} = \frac{4 \cdot 0.00376}{\pi \cdot 0.02^2} = 12$$

$z_2 = 12$ (Número de conductos adicionales para satisfacer $\delta \geq 1$)

Los conductos z_2 adicionales, de diámetro $d_s = 20mm$ deben ser colocados en los límites de la parrilla o empotrados en la cámara de combustión para el aseguramiento del aire secundario suficiente para la combustión de los gases combustible de la gasificación.

4 - Determinación de $\lambda_{eq} = \frac{d}{D} eq = \sqrt{z_1} \cdot \frac{d_o}{D}$.

$$D_0 = 40\text{mm}$$

$$Z_1 = 6$$

$$D = 220\text{mm}$$

$$\lambda = \frac{d}{D} eq = \sqrt{z_1} \frac{d_0}{D} = 0,45$$

$$\lambda_{eq} = 0.45 > \lambda_{eq_{\min}} = 0.3$$

5 - Determinación de la altura de la hornilla

$$H_{\text{máx}} = 620\text{mm}$$

$$H_1 = 150\text{mm} \Rightarrow \text{Altura del nivel del piso a la base de la parrilla del combustible.}$$

$$H_2 = 460\text{mm} \Rightarrow \text{Altura de la parrilla del combustible hasta el nivel de la superficie inferior de la olla.}$$

$$H_{\text{gasif}} = 160\text{mm} \Rightarrow \text{Altura de los gasificadores.}$$

$$H_{\text{vacío}} = 275\text{mm} \Rightarrow \text{Altura de los gasificadores, al fondo de la olla.}$$

6 - Con la altura del gasificador $H_{\text{gasif}} = 160\text{mm}$, diámetro de la cámara de combustión $D = 220\text{mm}$, número de gasificadores $z_1 = 6$, y su diámetro $d = 40\text{mm}$, así como los conductos adicionales $z_2 = 12$; $d_s = 20\text{mm}$, conectados a los bordes de la parrilla. Considerando dos valores posibles de la densidad

$$\text{natural del aserrín de madera: a) } \rho_0 = 75 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \text{ y b) } \rho_0 = 250 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Determinar la masa de combustible en la cámara de combustión.

$$A_{\text{efc}} = \frac{\pi \cdot D^2}{4} - \left[\frac{\pi \cdot d_0^2}{4} \cdot z_1 + \frac{\pi \cdot d_s^2}{4} \cdot z_2 \right]$$

$$A_{efc} = \frac{\pi \cdot 0.220^2}{4} - \left[\frac{\pi \cdot 0.04^2}{4} \cdot 6 + \frac{\pi \cdot 0.07^2}{4} \cdot 1 \right]$$

$$A_{efc} = 0.034m^2$$

Volumen efectivo.

$$V_{efc} = A_{efc} \cdot H_{gasif}$$

$$V_{efc} = 0.034 \cdot 0.16$$

$$V_{efc} = 0.0054m^3$$

Masa de combustible.

$$w_{comb1} = \rho_{0_{aserrin}} \cdot V_{efc}$$

$$w_{comb1} = 75 \cdot 0.0054 \quad w_{comb2} = 250 \cdot 0.0054$$

$$w_{comb1} = 0.405kg \quad w_{comb2} = 1.35kg$$

7 - Con $\left(\lambda_{eq} = \frac{d}{D} eq = 0.45 \right)$ determinar el coeficiente de transformación de la biomasa

 En la tabla 2.2 para aserrín de madera $\psi \approx 0.67$ (interpolando).

8 - Masa de combustible que efectivamente se transforma en gas combustible.

$$w_{gasif1} = \psi \cdot w_{comb1}$$

$$w_{gasif1} = 0.67 \cdot 0.405 \quad w_{gasif2} = 0.67 \cdot 1.35$$

$$w_{gasif1} = 0.27kg \quad w_{gasif2} = 0.90kg$$

9 - Determinación de la energía aportada por el combustible (Gasificado).

$$E_{comb1} = V_g \cdot w_{gasif1}$$

$$E_{comb} = 3733 \cdot 0.27 \quad E_{comb2} = 3733 \cdot 0.90$$

$$E_{comb1} = 1008 \text{ kJ} \quad E_{comb2} = 3360 \text{ kJ}$$

Donde:

$V_g = 3733 \text{ kJ/kg} \Rightarrow$ Valor calórico de los gases combustibles.

10 - Determinación de la Potencia Media.

$$N_{gasif} = 0.06 \cdot V_g \cdot ICP$$

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

$$A_{gasif.perim} = \pi \cdot d_0 \cdot z_1 \cdot H \text{ m}^2$$

$$A_{gasif.perim} = \pi \cdot 0.040 \cdot 6 \cdot 0.16$$

$$A_{gasif.perim} = 0.121 \text{ m}^2$$

$$ICP = 241 \cdot 0.121 + 4.92$$

$$ICP = 34 \text{ g}$$

$$N_{gasif} = 0.06 \cdot 3733 \cdot 34$$

$$N_{gasif} = 7633 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 2.11 \text{ kW}$$

11 - Determinación del tiempo de autonomía de la combustión sin carga adicional.

$$t_1 = \frac{E_{comb1}}{N_{gasif}} = \frac{1008}{7633} = 0.13h \quad t_2 = \frac{E_{comb1}}{N_{gasif}} = \frac{3360}{7633} = 0.44h$$

$$t_1 = 8\text{min}; \quad t_2 = 27\text{min}$$

Los experimentos realizados muestran que el tiempo de autonomía puede ser superior a los calculados por estas expresiones, debido fundamentalmente, a las condiciones de gasificación combustión de los experimentos que responden al modelo teórico (Cámara de combustión abierta) y las condiciones reales (Cámara cerrada de elevada eficiencia térmica). Experimentos realizados por (Infante, C. 2010) con similares condiciones de la cámara de combustión y una masa de 2,5 kg del mismo tipo de combustible (Aserrín de madera), tuvo una autonomía de más de 3,5 horas, lo que permite hacer una equivalencia con los tiempos logrados por la hornilla en las dos posibles condiciones del combustible.

$$t_1 = 23 \text{ min}; \quad t_2 = 76\text{min}$$

No obstante, se está considerando 6 gasificadores de 40 mm de diámetro que generan una potencia de 2kW muy superior a la requerida en una hornilla de cocción de alimentos (Hornilla de inducción eléctrica (0,8-1,2) kW), por lo que la hornilla diseñada se debe trabajar con 3 gasificadores de esta característica, con una potencia térmica de 1,2kW y una autonomía de trabajo del doble de la anteriormente mostrada ($t_1 = 46 \text{ min}; t_2 = 152\text{min}$), la experiencia demuestra que se obtiene el mismo resultado con 6 gasificadores de 20 mm de diámetro o 5 gasificadores de 25 mm de diámetro y la misma altura de trabajo de 160 mm

12-Determinación de las dimensiones del conducto de aire de alimentación principal.

$$A_{alim} \leq A_{gasif} + A_{secund} \cdot 0.2$$

Como se consideró $A_{gasif} = A_{secund}$.

$$A_t = 2 \cdot A_{gasif}$$

$$A_t = 2 \cdot 0.0075$$

$$A_t = 0.015 m^2$$

$$A_{a\lim} \leq 0.003 m^2$$

$$\frac{\pi \cdot d_a^2}{4} \leq 0.003$$

$$d_a \leq \sqrt{\frac{4 \cdot 0.003}{\pi}}$$

$$d_a \leq 62 mm$$

El conducto de alimentación se debe hacer de mayor diámetro que el calculado, con el propósito de estrangular hasta asegurar el proceso de gasificación y combustión

13 -Considerar un área de evacuación de la hornilla igual o superior al área del conducto principal de alimentación de aire ($A_{escape}=0.006m^2$).

14-Para aumentar eficiencia térmica de la hornilla, instalar un horno que aproveche el calor de los gases de la combustión que se evacuan por las dos chimeneas.

3.2 – FACILIDADES DE LA HORNILLA DISEÑADA.

- 1- Ahorro de componentes metálicos en su estructura principal.(Utiliza el barro cocido)
- 2- Posibilidad del uso de cualquier combustible sólido, con elevados índices de eficiencia en la combustión.

El principio de la multitubularidad provocada asegura el proceso de gasificación espontáneo y natural, que es la garantía del funcionamiento invariable de la hornilla con cualquier biomasa (briquetas macizas o tubulares, leña en trozos, hojas de árboles, cereales, cáscara de arroz, cáscara de café, aserrín de madera, etc.).

- 3- Elevada eficiencia térmica de la instalación y del sistema térmico.
 - a) Aislamiento adecuado de la cámara de combustión.
 - b) Posibilidad de recuperación del calor en el horno.
 - c) Organización adecuada del proceso de cocción de alimentos.
 - d) Regulación del proceso de gasificación-combustión, según las exigencias de la aplicación (Regulación del aire de alimentación, regulación de la chimenea o ambos simultáneamente).
- 4- Facilidad de sustitución o transformación de la hornilla
 - a) Reducir el número de gasificadores o quitarlos todos (Combustibles en trozos).
 - b) Colocar la olla directamente a la llama, o colocar plancha, para transmitir el calor por conducción y radiación.
 - c) Utilizar la cámara de combustión como la hornilla
 - d) Utilizar la hornilla con alimentación de aire por el cenicero y reparto del mismo en aire primario y secundario
 - e) Utilizar la hornilla con alimentación simultánea del aire por el cenicero y por la parte superior de la misma, utilizando las cámaras de calentamiento del aire secundario..

3.3 – ESTRUCTURA Y FUNCIONAMIENTO DE LA HORNILLA EFICIENTE (HPFB: 00 - 00 - PE).

3.3.1 – Estructura dela hornilla eficiente (HPFB: 00 – 00 – PE).

La hornilla eficiente constituye un artículo de primer orden, formado por una unidad de primer orden y seis tipos de piezas como se muestra en el documento precedente.

1. HPFB: 00 - 01, Cuerpo de la hornilla

Representa el cuerpo de la hornilla, construido en su estructura por un cilindro de barro cocido, con nervios en la parte inferior interior y la ventana de alimentación de aire en la superficie cilíndrica inferior, en su porción superior dispone de dos cavidades, simétricamente colocadas, que sirven para soportar los conductos de evacuación de gases de la combustión.

2. HPFB: 01 - 00 - PE, Gasificadores.

Esta unidad es fundamental para el aseguramiento del proceso de gasificación-combustión, su colocación en la hornilla tiene la finalidad de provocar la multitubularidad del colchón de combustible, sobre todo cuando el combustible empleado es de pequeña granulometría y sin densificar., no obstante, su efecto se incrementa para combustibles sólidos de otras características (Briquetas, trozos de leña o biomasas de alta granulometría), está constituida por tres elementos (1- Parrilla del combustible; 2- Gasificadores; 3- Conducto de aire secundario).

- **HPFB: 01-01, Parrilla del combustible.**

Una placa plana y circular de 25mm de espesor, con orificios pequeños para la evacuación de la ceniza, un orificio central de 65 mm de diámetro en su centro, para la ubicación del conducto de aire secundario y 6 orificios concéntricos de 35mm de diámetro, a 60° uno del otro para la ubicación de los gasificadores.

- **HPFB: 01-02, Gasificadores.**

Conductos (6) con una pequeña conicidad, de una longitud de 185 mm y alrededor de 120mm con orificios de 5mm, para el paso de los gases combustibles (Biogás) al conducto de colección.

- **HPFB: 01-03 Conducto de aire secundario.**

Conducto de 70x5 mm, con 6 agujeros de 20 mm de diámetro en la parte superior para el suministro directo de aire secundario a cada gasificador, este conducto debe ser ciego en la parte superior para que el suministro de aire secundario sea dirigido a cada gasificador.

3. HPFB: 00 - 02, Cámara de combustión..

La cámara de combustión tiene forma cilíndrica, con nervios planos en la parte inferior interior para soportar la parrilla del combustible, dos cavidades simétricamente colocadas en su parte superior, para el alojamiento de los conductos de evacuación de los gases de la combustión y debajo de estas 12 orificios para la alimentación del aire secundario.

4. HPFB: 00 – 03, Cilindro separador.

El cilindro separador del aire de alimentación, en aire primario y aire secundario, asegura el calentamiento del aire de alimentación en su descenso a la parte inferior de la parrilla (Aire primario) y su distribución, al pasar una parte de este por los orificios situados en la parte inferior de este cilindro (Aire secundario) el que experimenta un calentamiento superior, por su contacto directo con la cámara de combustión.

5- HPFB: 00 – 04, Soporte.

El soporte es una placa cilíndrica anular con un diámetro que juega con el diámetro exterior de la cámara de combustión y con una pestaña anular que cierra por su parte superior al separador cilíndrico formando con ello la cámara o conducto de aire secundario.

6- HPFB: 00 - 05, Conductos de evacuación de los gases de la combustión.

Conducto acodado que en su parte vinculada a la hornilla es prismática, con un conducto central de 50 mm de diámetro y su otra porción es cilíndrica acodada de similar diámetro interior.

3.3.2 – FUNCIONAMIENTO DE LA HORNILLA EFICIENTE.

(Ver plano de ensamble del anexo).

1. Cargar de combustible sólido sobre la parrilla (HPFB: 01-01), hasta la altura de los gasificadores (HPFB: 01-02), y ello realizarlo por la parte superior de la hornilla.

El suministro suplementario de combustible se realizará de la misma forma, retirando la olla.

2. Realizar la ignición del combustible, utilizando una porción de combustible convencional o biomasa de baja densidad, que se coloca debajo de la parrilla (El cuerpo de la hornilla en su porción inferior es abierta, por lo que la ceniza descarga al piso).
3. Estrangular el aire de alimentación hasta asegurar la estabilidad del proceso de gasificación - combustión.
4. Cuando el combustible no es de pequeña granulometría, conviene organizarlo alrededor de los espacios dejados por los gasificadores, de forma que su multitubularidad quede asegurada. En caso de leña en trozos o briquetas macizas o tubulares puede prescindirse de los gasificadores (HPFB: 01-02), no obstante, su presencia asegura el mejor funcionamiento del fogón, se convierten en conductos de aire secundario y con el conducto de aire secundario (HPFB: 01-04) aseguran el oxígeno necesario y suficiente para la combustión del biogás generado en el proceso de intensa gasificación.

Conclusiones Parciales Capítulo III

- La autonomía del proceso de combustión en la hornilla, puede superar una hora, sin alimentación suplementaria, si la densidad del combustible de pequeña granulometría supera los 250 kg/m^3 , lo que obliga a presionar en la cámara de combustión a los combustibles cuando las densidades aparentes sean inferiores.
- La hornilla está diseñada para funcionar con los 6 gasificadores y el conducto central del aire secundario, pero también con tres gasificadores en similar condición, para una potencia que se acerca más a la aplicación ($N= 1,2 \text{ kW}$). También son posibles las mismas opciones sin el conducto de aire secundario e incluso prescindiendo de los gasificadores, cuando utiliza leña en trozos, briquetas o carbón.
- La disminución del diámetro de los gasificadores a 20 mm, manteniendo la misma cantidad (6) o reduciendo en 5 su cantidad y utilizando un diámetro de 25 mm, satisfacen las condiciones de funcionalidad de la hornilla, para la aplicación de cocción de alimentos, con mejores índices de eficiencia en la combustión.
- El prototipo de hornilla diseñado utiliza el barro cocido, material disponible a bajo costo en el país, lo que posibilita, que su construcción resulte de muy bajo costo, sobre todo si se hacen producciones masivas.
- La versatilidad, asegurada por la intercambiabilidad de los elementos componentes de la hornilla, garantizan la posibilidad de ser usada en diferentes aplicaciones.

CONCLUSIONES GENERALES

1. El principio de la macro multitubularidad natural o provocada con los requerimientos que establece el estudio precedente realizado, garantizan un estable proceso de gasificación y con un manejo adecuado del aire primario y secundario se puede regular el proceso de la combustión del biogás generado, con altos índices de eficiencia del sistema térmico.
2. El modelo teórico del proceso de la gasificación- combustión, es una herramienta teórica para visualizar el comportamiento del proceso de transformación, pero al no tomar en consideración la superficie interior de los conductos por donde circula el biogás (Área Perimetral), que realmente participa en el proceso de gasificación, no debe ser utilizado como herramienta en el diseño de las tecnologías de gasificación donde se utilice la hermeticidad (Cámaras cerradas eficientes).
3. El prototipo de hornilla eficiente diseñada y sus posibilidades de transformación, permitirá seleccionar la variante factible desde el punto de vista del proceso de gasificación y combustión así como desde el punto de vista de su costo.
4. Los cálculos realizados para el diseño de la hornilla muestran que el número de 6 gasificadores, asegura el funcionamiento de la tecnología con buenos índices en la combustión, sin embargo, las dimensiones de la cámara de combustión, la altura de los gasificadores y su diámetro exterior, limitan la cantidad del combustible disponible y con ello, la autonomía de la hornilla sin alimentación suplementaria de combustible, por ello, resulta más apropiado, que la hornilla funcione con 3 gasificadores o con igual cantidad de los mismos, si se reducen sus diámetros (entre 20 y 25 milímetros), se posibilita una aceptable autonomía y una potencia y energía térmica en correspondencia con la aplicación.
5. La utilización del barro cocido como material para la construcción de más del 90% de los componentes de la hornilla, reduce los costos de la misma y asegura su factibilidad técnico-económica. Al utilizar de forma racional las biomásas residuales y otros combustibles sólidos disponibles, reducen el impacto ambiental que actualmente ocasiona el uso de las ineficientes tecnologías de combustión existentes.

RECOMENDACIONES

1. Construir y evaluar la hornilla eficiente, utilizando todas las posibilidades y definir cuál de ellas resulta la de mejores índices, para su futura extensión.
2. Hacer un estudio del comportamiento de diferentes mezclas de arcillas con aditivos refractarios, con el propósito de utilizar en el futuro desarrollo de esta tecnología, el material idóneo, que asegure una mayor vida útil de la misma.
3. Incorporar el estudio detallado de todos los índices térmicos que caractericen el proceso de gasificación- combustión y el sistema de combustión, incluyendo lo relacionado con el material de la hornilla y su vida útil.

BIBLIOGRAFÍA:

- Abel Leyva, Frank y Fundora Beltrán, Pedro. (2002.). *Construcción del fogón-gasificador para la investigación de combustión de sólidos*. Trabajo de Diploma. UCF.
- Asociación Española de Valorización. (2014, junio 20). Energética de la Biomasa (AVEBIOM). Recuperado a partir de www.avebiom.org
- Asociación Europea para la Biomasa. (2014, junio 20). Recuperado a partir de www.ecop.ucl.ac.be,
- Asociación para la Difusión del Aprovechamiento de la Biomasa en España. (2014, junio 20). Recuperado a partir de www.adabe.net
- Borroto Nordelo, Aníbal. (2007). *Combustión y Generación de Vapor*. Universidad de Cienfuegos: Editorial Universo Sur.
- Fernández Conde, Emilio. (1994). *Termodinámica Técnica.*, La Habana: Editorial Félix Varela.
- Fundora Acea, Irving. (2009). *Influencia de la geometría y la densidad de las briquetas cilíndricas tubulares y multitubulares de las biomásas, en los índices fundamentales de combustión*. Trabajo de Maestría. Universidad de Cienfuegos.
- Fundora Beltrán, Pedro (2003). *Estudio del proceso de densificación gradual de la paja de caña, para el perfeccionamiento de su proceso tecnológico*. Tesis en Opción de Ingeniería Mecánica. Universidad de Cienfuegos.
- González Maqueira, Miguel. (2000). *Estudio teórico sobre la combustión heterogénea, aplicación a la combustión de biomásas*. Trabajo de Diploma. España. Escuela Superior de Ingeniería Industriales y Minas de Vigo.
- González Dávila, Oriel (2011). *Metodología para el diseño de fogones gasificadores de biomásas, utilizando el principio de la multitubularidad en el combustible*. Trabajo de Diploma. Universidad de Cienfuegos.
- Infante, Cesar. (2010). *Evaluación térmica de prototipo de estufas eficientes para diferentes Biomásas*. Trabajo de Diploma .Universidad de Cienfuegos.

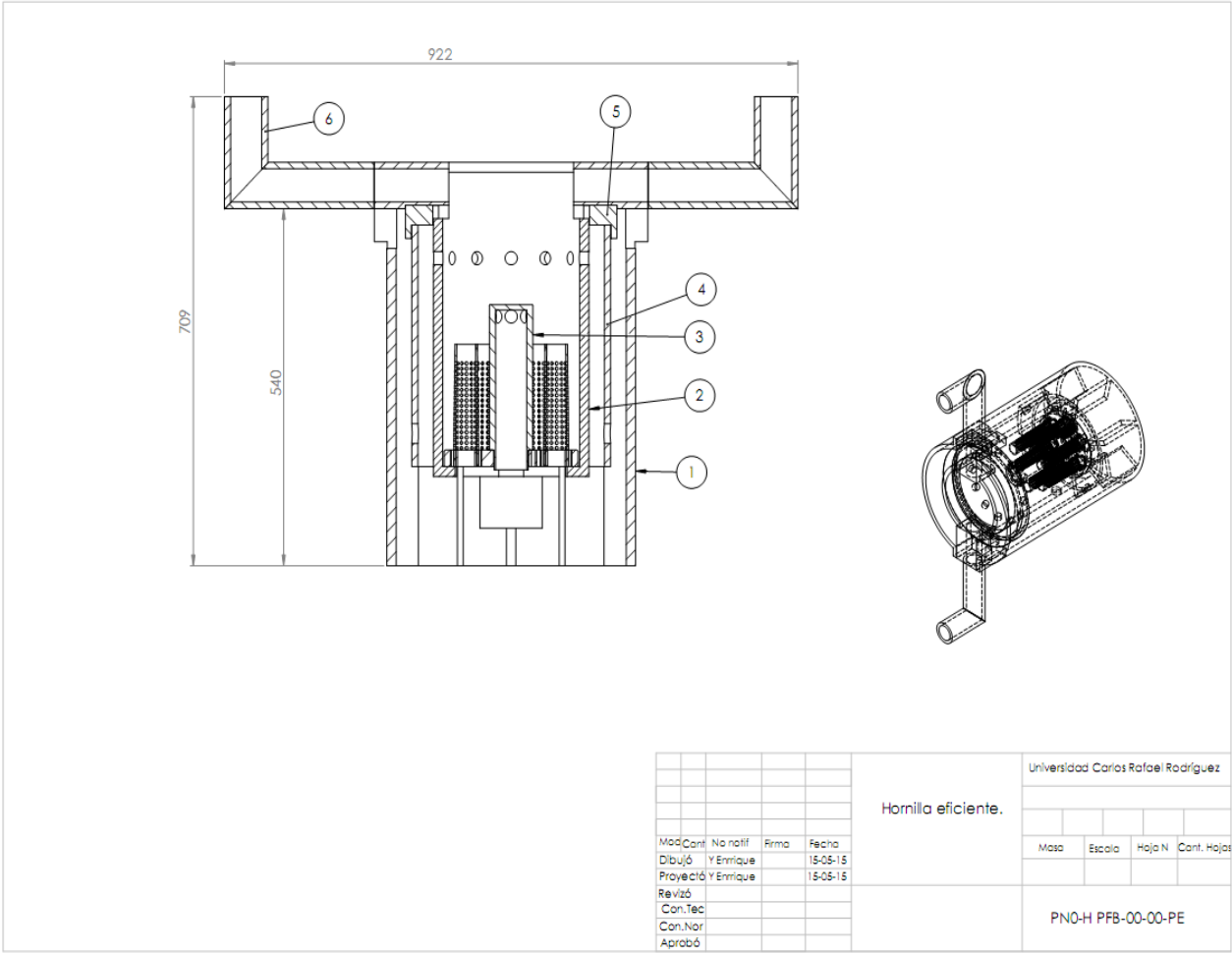
Meneses Subarnaba, Yulien. (2008). Evaluación del prototipo de fogones para el uso eficiente de las biomasas destinadas a la cocción de alimentos. Trabajo de Diploma, Universidad de Cienfuegos.

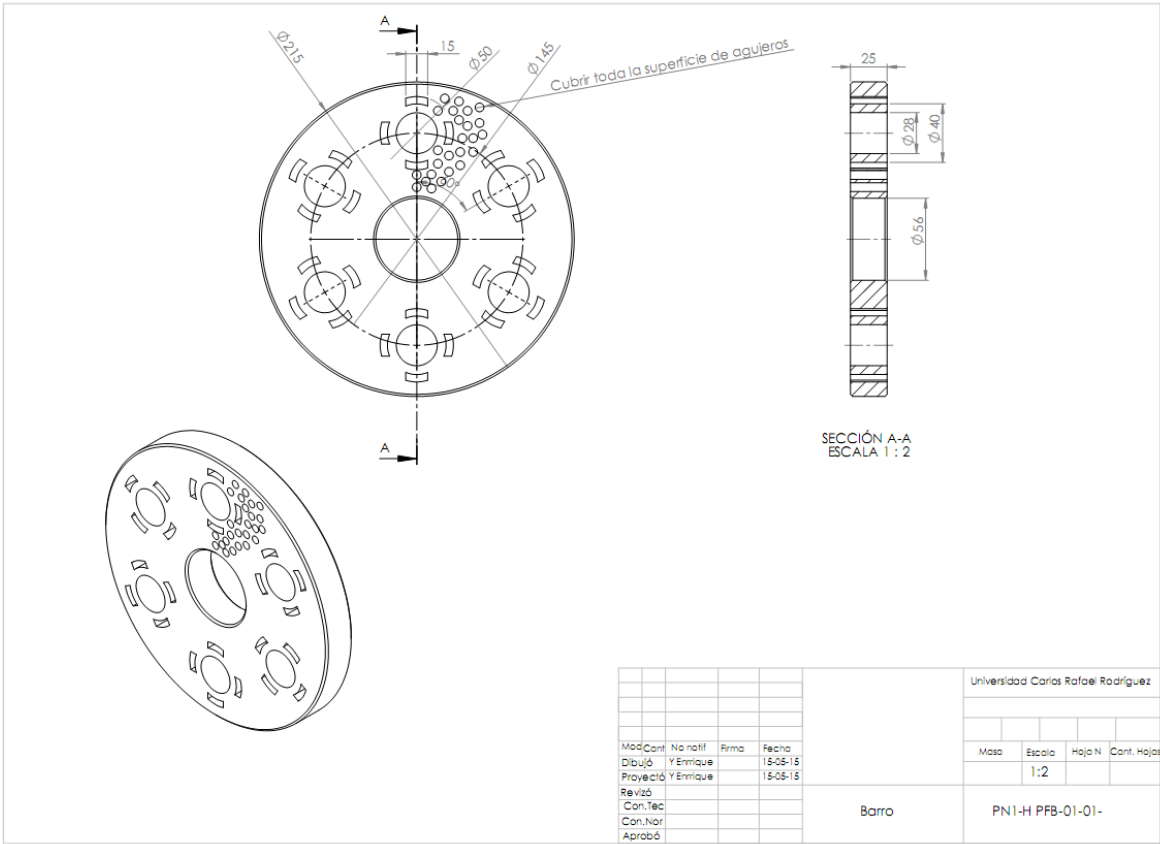
Mencía, H., Víctor. (2011). Metodología para el diseño de tecnologías de combustión de biomasas en pila de capa gruesa con gasificadores, empleando la multitubularidad Natural o Provocada. Trabajo de Maestría Universidad de Cienfuegos.

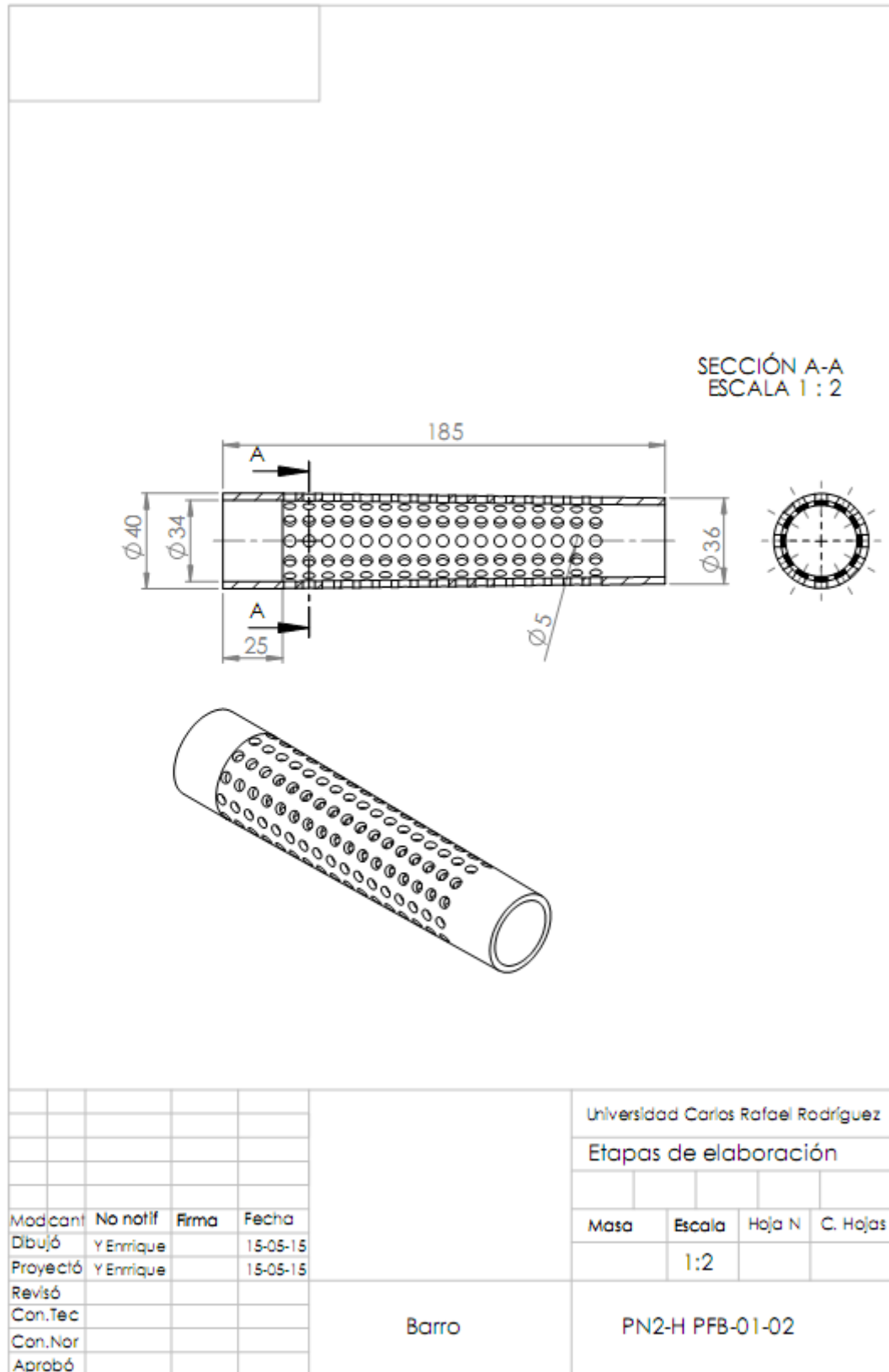
Rodríguez Arias, Abelardo Daniel. (2000). Teoría y Práctica de los Procesos de Combustión: (Combustible sólidos) Empresa de Comunicación y Tecnología: Editorial academia.

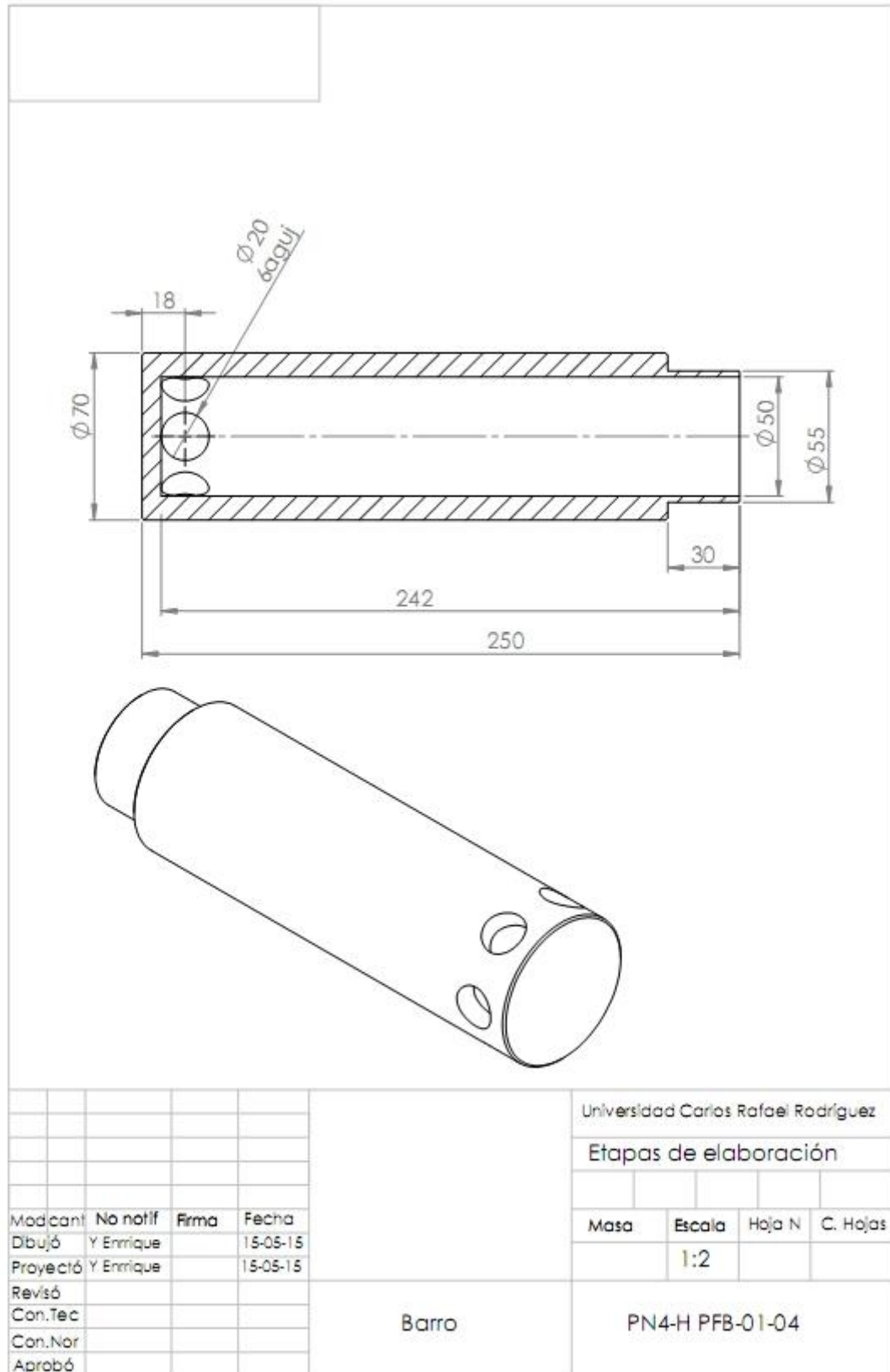
ANEXOS

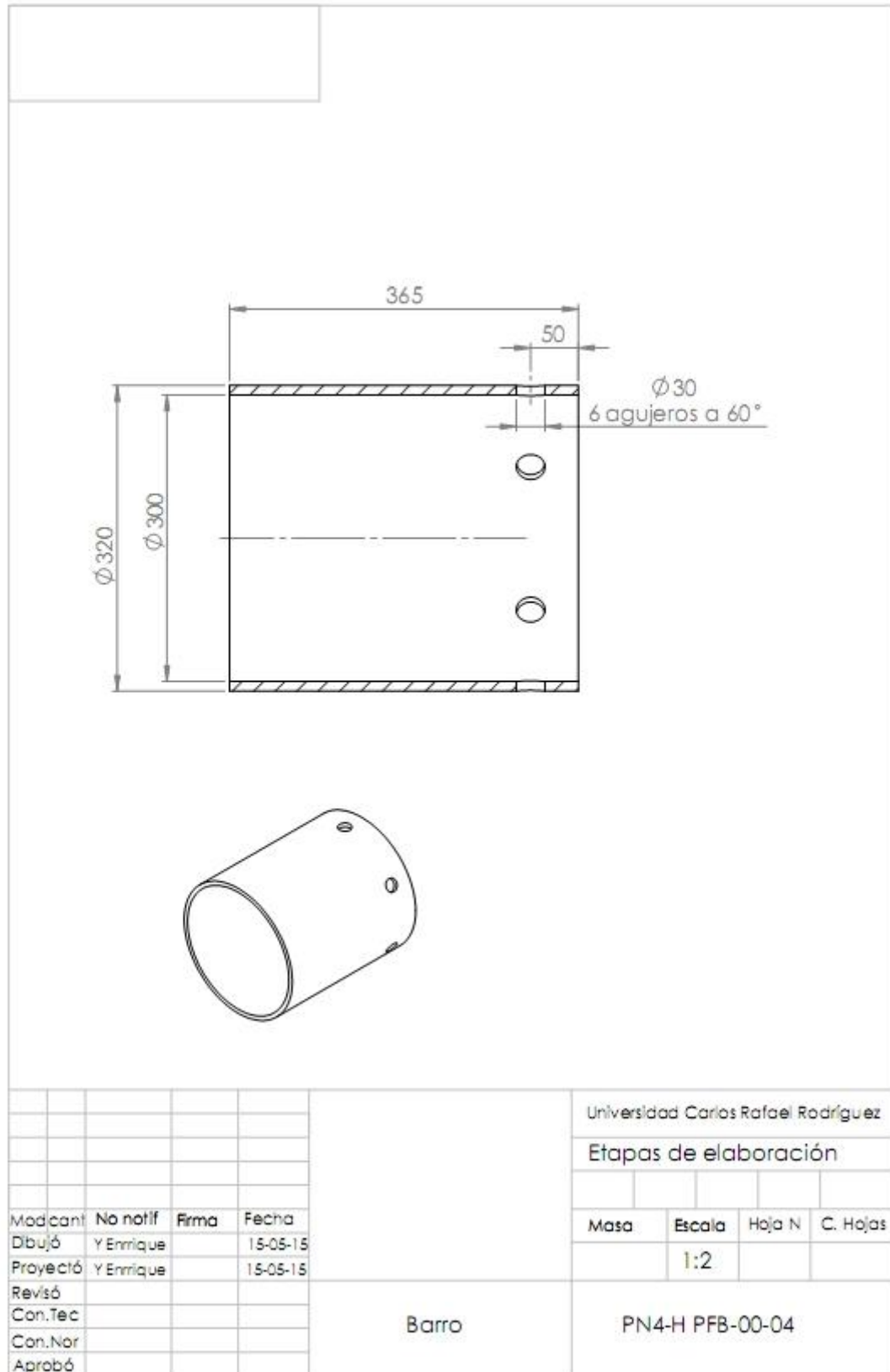
Anexo 1: Plano principal de la hornilla eficiente

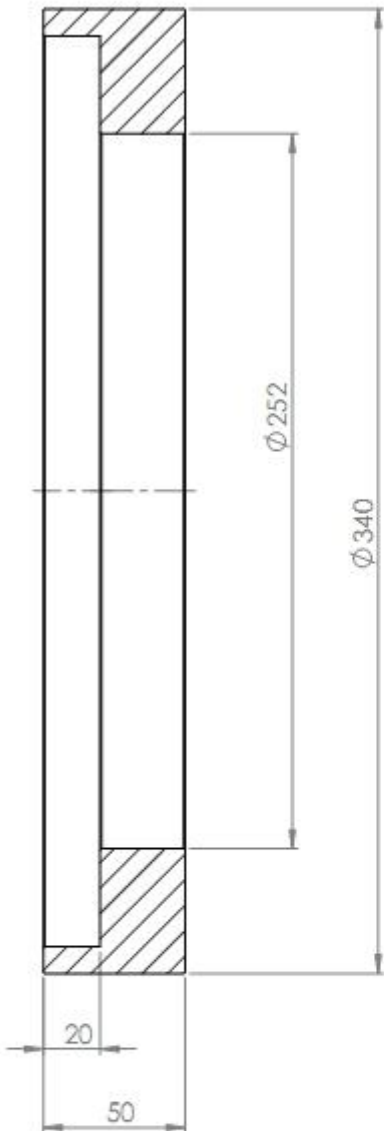


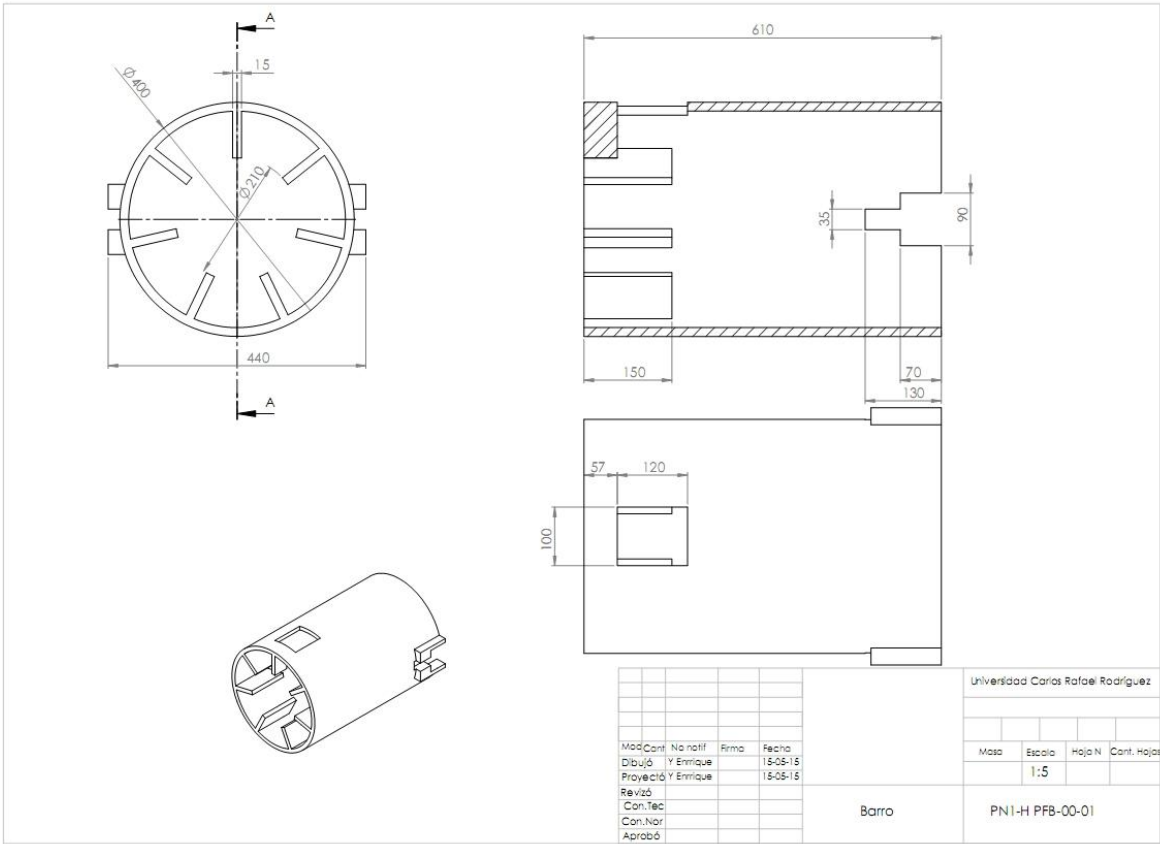


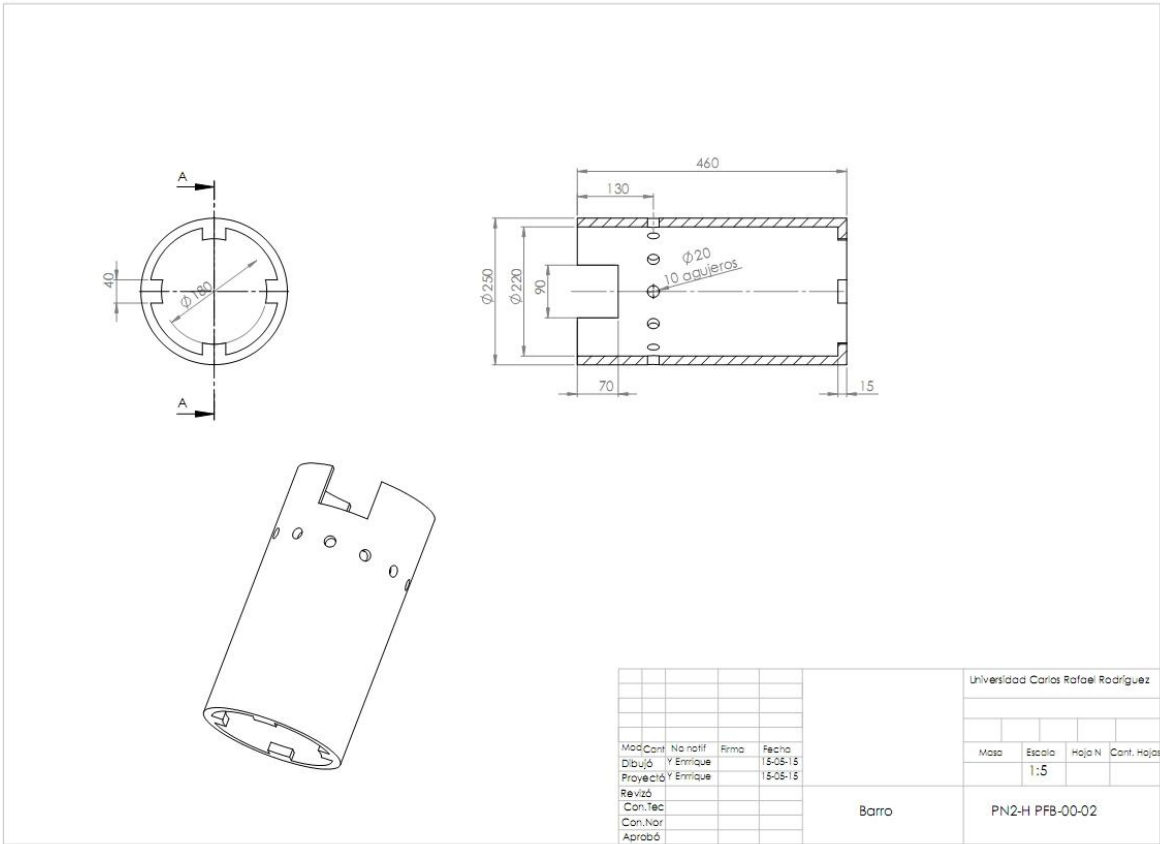


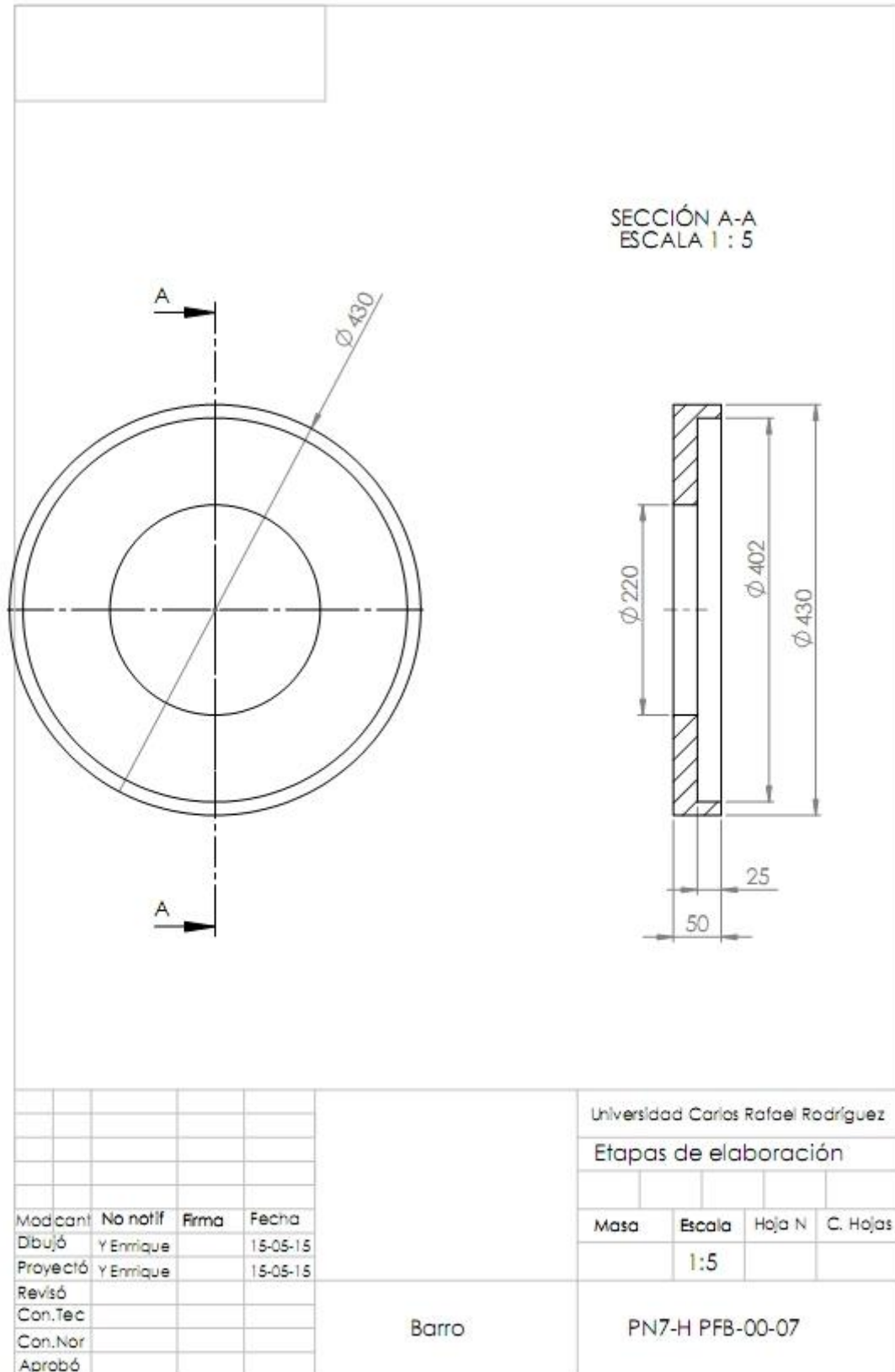


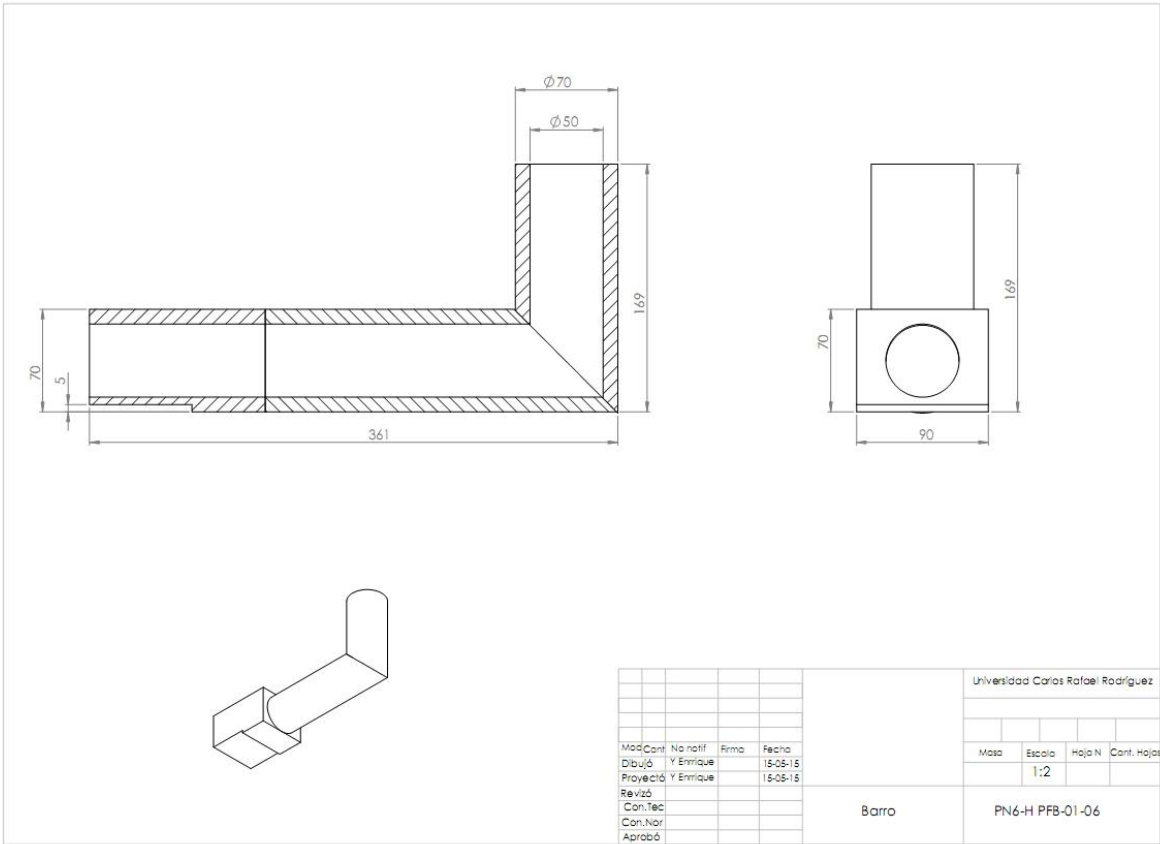


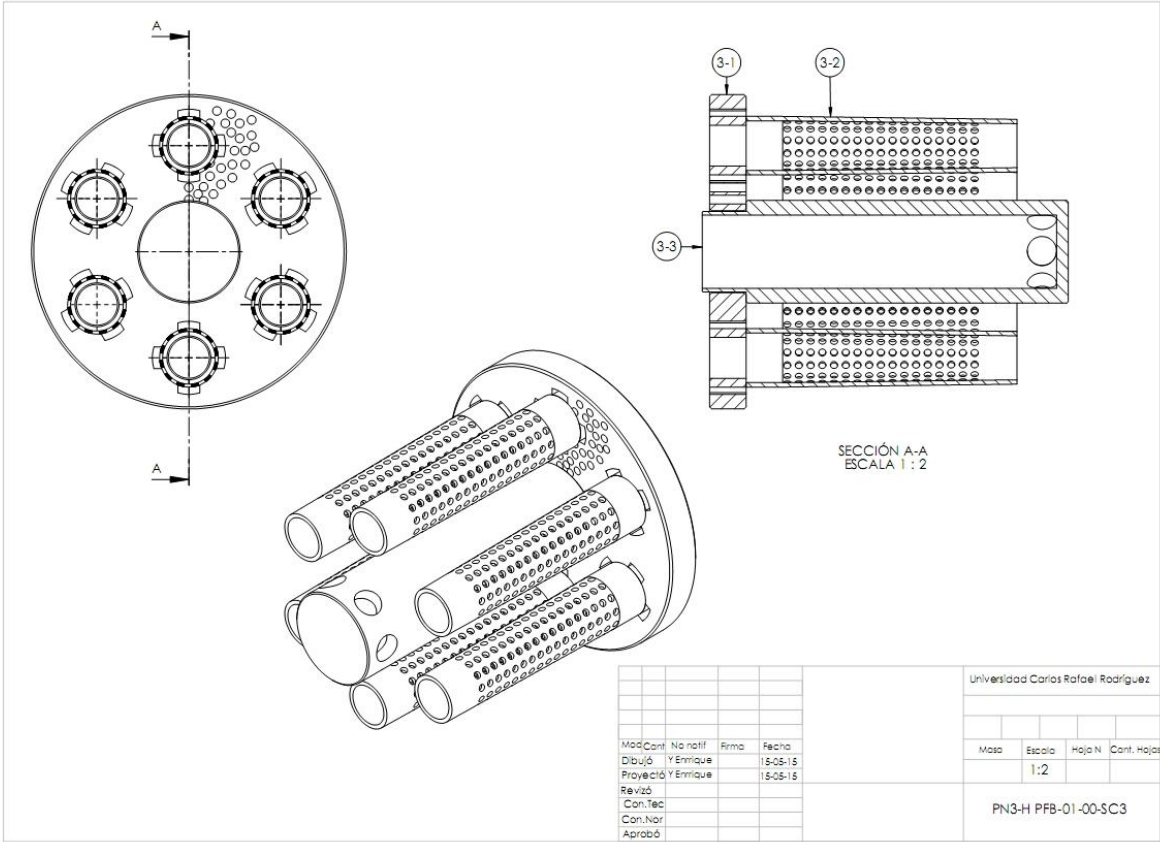
																																																																															
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr> <th>Modifican</th><th>No notif</th><th>Firma</th><th>Fecha</th><th> </th></tr> <tr> <td>Dibujó</td><td>Y Enrique</td><td> </td><td>15-05-15</td><td> </td></tr> <tr> <td>Proyectó</td><td>Y Enrique</td><td> </td><td>15-05-15</td><td> </td></tr> <tr> <td>Revisó</td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr> <td>Con.Tec</td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr> <td>Con.Nor</td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr> <td>Aprobó</td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> </table>																									Modifican	No notif	Firma	Fecha		Dibujó	Y Enrique		15-05-15		Proyectó	Y Enrique		15-05-15		Revisó					Con.Tec					Con.Nor					Aprobó					Universidad Carlos Rafael Rodríguez Etapas de elaboración <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td> </tr> <tr> <th>Masa</th><th>Escala</th><th>Hoja N</th><th>C. Hojas</th><th> </th></tr> <tr> <td> </td><td>1:2</td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> </table> Barro PN5-H PFB-00-05										Masa	Escala	Hoja N	C. Hojas			1:2			
Modifican	No notif	Firma	Fecha																																																																												
Dibujó	Y Enrique		15-05-15																																																																												
Proyectó	Y Enrique		15-05-15																																																																												
Revisó																																																																															
Con.Tec																																																																															
Con.Nor																																																																															
Aprobó																																																																															
Masa	Escala	Hoja N	C. Hojas																																																																												
	1:2																																																																														

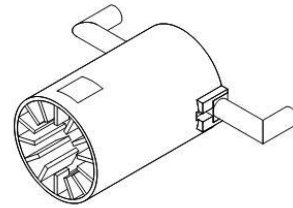












				Oleohidráulica Cfgs Etapas de Elaboración			
Modo	Cont	Na	Entif	Forma	Fecha		
Dibujó				Y Enrique	15-05-15	Masa	Escala
Proyectó				Y Enrique	15-05-15	Hoja N	Cont. Hoja
Revisó							
Con. Tec							
Con. Nor							
Aprobó							