



UNIVERSIDAD DE CIENFUEGOS

“Dr. Carlos Rafael Rodríguez Rodríguez.”

Facultad de Ingeniería Mecánica.

TÉSIS EN OPCIÓN AL TÍTULO DE MÁSTER EN CIENCIAS TÉCNICAS.

Especialidad: Eficiencia Energética

Título. Metodología para el diseño de tecnologías de combustión de biomásas en pila de capa gruesa con gasificadores, empleando la Multitubularidad Natural o Provocada.

Maestrante: Lic. Víctor Narciso Mencía Hourruitiner.

Tutor: Dr. Pedro Fundora Beltrán.

Hago constar que el presente trabajo fue realizado en la Universidad de Cienfuegos: “Carlos Rafael Rodríguez” como parte de la culminación de los estudios de la Maestría en Eficiencia Energética, autorizando a que el mismo sea utilizado por la institución para los fines que estime conveniente, tanto de forma parcial como total y que además no podrá ser presentado en eventos ni publicado sin la aprobación del autor.

Firma del Autor

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

Firma del tutor
Información Científico Técnica
Nombres y Apellidos

Computación
Nombres y Apellidos

SÍNTESIS.

En el trabajo se hace una evaluación de las tecnologías de combustión y de los combustibles sólidos (Biomásas) y se proponen las modificaciones pertinentes. Las respuestas favorables de la combustión de diferentes combustibles sólidos, en la tecnología evaluada, reafirma el criterio de la multitubularidad como una condición indispensable para la gasificación de los combustibles sólidos.

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

ÍNDICE	Pág.
Portada.....	I
Pensamiento.....	II
Agradecimientos.....	III
Dedicatoria.....	IV
Nomenclatura.....	V
Síntesis.....	VI
INTRODUCCIÓN.....	1
- Problema.....	5
- Hipótesis.....	5
- Objetivo general.....	5
- Tareas de Investigación.....	5
- Aportes.....	6
- Novedad del trabajo.....	6
CAPÍTULO 1.- ESTADO DOCUMENTAL DEL USO ENERGÉTICO DE LA BIOMASA.	
1.1. La Biomasa como fuente de energía.....	7
1.1.1. El recurso biomásico.....	8
1.1.2. Utilización de la biomasa.....	9
1.2. Algunas características de la biomasa.....	11
1.3. Procesos de conversión de la biomasa en energía.....	12
1.3.1. Métodos Termoquímicos.....	13
1.3.2. Métodos biológicos.....	14
1.3.3. Aplicaciones.....	14
1.4. Situación mundial de la biomasa.....	17

1.4.1. Biomasa. Algunos datos básicos.....	17
1.5. Ventajas y desventajas del aprovechamiento de la biomasa.....	18
1.5.1. Ventajas.....	18
1.5.2. Desventajas.....	19
1.6. Estado del Arte.....	20
1.6.1. Problemas asociados con la utilización de la biomasa como combustible.....	20
1.6.2. Modelos de combustión de sólidos.....	21
1.6.3. Experimentos de combustión de briquetas.....	21
1.6.4. Modelo de núcleo sin reaccionar para partículas cilíndricas de tamaño constante.....	23
1.7. Cinética de la combustión.....	25
1.8. Influencia de la densidad y la geometría de la briqueta en la combustión.....	26
1.9. Características térmicas de las briquetas cilíndricas tubulares de biomasa.	28
1.9.1. Determinación de las magnitudes geométricas de las briquetas tubulares y multitubulares.....	28
1.9.2. Eficiencia del sistema térmico.....	29
1.9.3. Combustión en cámara cerrada de briquetas tubulares y multitubulares.....	31
1.10. Conclusiones parciales.....	31

CAPÍTULO 2. EVALUACIÓN TÉRMICA DE LA MULTITUBULARIDAD

COMO TECNOLOGÍA EFICIENTE PARA LA COMBUSTIÓN DE LA BIOMASA.

2.1. Prototipo de Estufa.....	34
2.2. Caracterización de los combustibles sólidos para su empleo en el prototipo de estufa eficiente.....	42
2.2.1. La Leña como combustible.....	43
2.2.2. Las Briquetas como combustible.....	43
2.2.3. Biomasa sin densificar (a granel).....	45
2.3. Metodología para la evaluación de la estufa.....	46
2.3.1. Introducción.....	46
2.3.2. Definición de códigos.....	47
2.4. Estudio preliminar de algunas alternativas de formación de estufa, para la combustión de biomosas en sus diferentes estados.....	52
2.4.1. Introducción.....	52
2.4.2. Parrilla mono tubular con hornilla de recuperación.....	53
2.4.3. Parrilla mono tubular con conductos de aire secundario.....	56
2.4.4. Parrilla con 4 gasificadores de 40 mm de diámetro.....	56
2.4.5. Parrilla con 3 gasificadores de 60 mm de diámetro.....	57
2.4.6. Parrilla con gasificadores para leña y briquetas como combustible.....	59
2.5. Determinación de la eficiencia del sistema térmico (n_{sc}).....	59
2.6. Determinación de la energía media específica disponible (Q_e), sobre la hornilla eléctrica del hogar (como patrón de referencia).....	61
2.7. Determinación de la energía media y la potencia disponible en la hornilla recuperativa.....	62
2.8. Análisis de los resultados de todas las alternativas de experimentos.....	64
2.9. Conclusiones parciales.....	67
CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA DE DISEÑO DE GASIFICADORES DE	

BIOMASAS.

3.1. Introducción.....	68
3.2. Índice de transformación de las biomosas en biogás, durante el proceso de gasificación.....	69
3.2.1. Gasificación de biomosas en la combustión en lecho fijo de capa gruesa con multitubularidad provocada.....	69
3.2.2. Determinación del Índice de transformación de biomosas en el proceso de gasificación (ψ).....	70
3.3. Dimensionado preliminar de una cámara de combustión con sus dispositivos de gasificación – combustión.....	83
3.3.1. Dimensionado de la cámara de combustión.....	83
3.3.2. Forma geométrica de la cámara de combustión.....	83
3.3.3. Metodología para el dimensionado de la cámara de combustión y dispositivos de gasificación.....	86
3.4. Diseño de prototipo de fogón gasificador.....	87
3.4.1. Principio de la Multitubularidad.....	87
3.4.2. Ejemplo de cálculo.....	89
3.5. Facilidades del fogón diseñado.....	95
3.6. Memoria descriptiva del Fogón gasificador.....	96
3.7. Conclusiones parciales.....	100
CAPÍTULO 4. FACTIBILIDAD ECONÓMICA Y AMBIENTAL.	
4.1. Análisis económico.....	102
4.2. Ingeniería básica.....	102
4.2.1. Origen y forma de adquisición.....	102
4.2.2. Consumo energético.....	103

4.2.3. Descripción del proceso tecnológico.....	103
4.2.4. Demanda.....	103
4.2.5. Fuerza de trabajo.....	103
4.3. Distribución de las producciones.....	104
4.4. Ingresos por ventas.....	104
4.5. Costos de inversión.....	104
4.5.1. Capital fijo.....	104
4.5.1.1. Costo de fabricación del fogón.....	105
4.5.1.2. Costo de materiales auxiliares.....	106
4.5.1.3. Gasto de salarios.....	107
4.5.1.4. Costo de amortización.....	108
4.5.1.5. Costo por consumo de energía eléctrica.....	108
4.5.1.6. Total de gastos directos.....	109
4.5.1.7. Total de gastos indirectos.....	109
4.5.2. Capital de trabajo.....	110
4.6. Costos totales de producción.....	110
4.7. Fuente de financiamiento.....	112
4.8. Estados financieros.....	112
4.9. Indicadores fundamentales del proyecto.....	113
4.9.1. Método del Valor Actual Neto (VAN).....	113
4.9.2. Tasa Interna de Retorno (TIR).....	114
4.9.3. Periodo de Recuperación (PR).....	114
4.10. Análisis ambiental.....	117
4.10.1. Potencial de biomásas residuales y su impacto medioambiental.....	118
4.11. Conclusiones parciales.....	119

CONCLUSIONES.....	120
RECOMENDACIONES.....	121
BIBLIOGRAFÍA.....	122
ANEXOS.....	127

INTRODUCCIÓN

Durante el desarrollo de la humanidad el consumo de energía ha tenido una tendencia creciente, aumentando ésta bruscamente a partir de la Revolución Industrial. El esquema energético desde comienzos del siglo XX ha estado basado fundamentalmente en combustibles fósiles, principalmente petróleo y carbón, los cuales suministran hoy en día más del 80 % de la energía consumida a escala mundial, con el complemento de la energía nuclear a partir de la segunda mitad del siglo. En los inicios del desarrollo industrial y hasta décadas pasadas, el consumo energético no constituía un problema para la humanidad, pues existía una abundancia relativa de combustibles fósiles y no había hecho tan evidente la afectación de su uso sobre el medio ambiente, a partir de la década de los 70, los impactos ambientales alcanzaron tal magnitud que el hombre comenzó a preocuparse por estos efectos ^(Borroto, 1997; Turrini, 2006).

La biomasa es la energía más antigua del mundo, existiendo en la mayoría de los países grandes cantidades de residuos que pueden ser aprovechados como combustible. Especialistas en la materia aseguran que de esta aprovecharse correctamente pudiera aportar una mayor contribución al esquema energético de la humanidad. Sin embargo un gran número de razones tecnológicas, económicas, políticas, sociales y ambientales afectan este aporte.

Uno de los problemas más acuciantes que enfrenta la humanidad en nuestros tiempos es el de encontrar una solución al deterioro de las condiciones medioambientales a escala global, como consecuencia de la actividad industrial de las últimas centurias, donde la política seguida para el desarrollo se ha basado en la explotación indiscriminada de los recursos, sin tener en consideración su impacto en el entorno.

Desde el Protocolo de Kyoto, convocado por la Organización de Naciones Unidas, en la Comisión de Cambios Climáticos muchas naciones acordaron la reducción de emisiones que contribuyen al llamado efecto invernadero, entre 5 y 8 % para el 2012, tomando como base de comparación los niveles existentes en 1990, con lo cual se pone en evidencia la necesidad de buscar vías alternativas de obtención de energías «limpias», que hagan posible una vía «suave» de desarrollo energético, único camino posible para un desarrollo sostenible para la humanidad. Aproximadamente el 40 % de la emisión de gases de efecto invernadero proviene del transporte y la generación de energía eléctrica.

En este sentido se señalan tres direcciones principales para conformar una política energética acorde al desarrollo sustentable:

1. *Producir toda la energía que se requiere para el desarrollo.*
2. *De la forma más económicamente posible.*
3. *Minimizando los daños al entorno.*

Para lo cual es necesario tener en cuenta las siguientes premisas:

- I. Aumento de la eficiencia energética, eliminando esquemas de consumo irracionales, reduciendo la intensidad energética en los procesos industriales, aprovechando las fuentes secundarias de bajo potencial, utilizando sistemas de cogeneración, y empleando en general la energía de acuerdo a su calidad.
- II. Sustitución de fuentes de energía, por otras de menor impacto ambiental, en particular por fuentes renovables, tales como energía solar, energía eólica, energía geotérmica, hidroenergía, biomasa, energía de los océanos, etc.
- III. Empleo de tecnologías para atenuar los impactos ambientales, o tecnologías limpias, como son los sistemas depuradores de gases de combustión o las tecnologías de gasificación del carbón en ciclos combinados con turbinas de gas.

Aunque la única salida posible es hacer una elección energética de acuerdo con las leyes de la naturaleza, las que brindan a todos los seres una vida consecuente sin privilegiar a nadie, tomando «el camino del Sol hacia un desarrollo sostenible», lo cual puede corroborarse al examinar las seis características principales de la elección solar:

1. Fuentes inagotables y abundantes. Las fuentes renovables de energía, es decir, las solares directas (solar térmica y fotoeléctrica) e indirectas (viento, agua, biomasa), nunca se agotan mientras exista el Sol, y son muy abundantes.
2. Fuentes que no aportan desequilibrio ambiental. Desaparecen las causas del efecto invernadero, de las lluvias ácidas y de las contaminaciones por radiactividad. Se reducen drásticamente los gastos de agua porque desaparece la fase de extracción de combustible, «comilona» de agua.
3. Fuentes distribuidas y disponibles en todo el planeta. La presencia de las fuentes renovables en todos los lugares produce dos ventajas suplementarias: a igual energía eléctrica producida, la industria energética solar da trabajo a muchas más personas que la industria energética

convencional (hasta cinco veces más), y se puede superar la crisis agrícola actual debida a la fuga de muchos campesinos hacia la ciudad, entre otras razones.

4. Conexión civil-militar. Con estas fuentes ese peligro es inexistente. Además, se protege la vida del pueblo porque, debido a la distribución de las fuentes de energía en todo el territorio, ningún enemigo pudiera paralizar todo un país con ataques militares concentrados.

5. Tiempos cortos para la instalación de sistemas de producción de energía eléctrica.

6. Aspectos económicos. En este sentido es preciso detallar que los subsidios públicos para la promoción de las fuentes renovables llegaron a un total de cincuenta mil millones de dólares a nivel mundial en los últimos veinte años, o sea, 2 500 millones de dólares por año, versus los 300 000 millones por año que se destinan para las energías convencionales. (Enrico Turrini, Publicado en *Energía y tú*, No. 28, oct.- dic., 2009).

En Cuba, las principales fuentes renovables de energía en explotación se encuentran concentradas en la biomasa (bagazo, leñas combustibles y el biogás) (96,42%), seguido por la energía hidroeléctrica (3,22%), y en menores proporciones la energía solar (0,24 %) y la energía eólica (0,12%), respectivamente. La cantidad total de energía renovable estimada de la biomasa, la hidroenergía, la solar y la eólica presenta un valor de 187 882 t equivalentes, lo cual es casi el 5 % de la producción cubana de petróleo crudo en el 2008.

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

La biomasa cañera es la forma más difundida en Cuba de obtener electricidad a partir del Sol. A escala mundial, la biomasa es responsable de 6 % de la generación de electricidad. Para 2020 se espera que la biomasa cubra hasta 20 % de la demanda global de energía eléctrica.

Los indicadores socioeconómicos de Cuba y su proyección a corto y mediano plazo señalan que las actividades económicas se encuentran en expansión, por lo que la demanda de energía (Térmica y Eléctrica) tendrá un aumento proporcional a dicha expansión. A tal efecto entre los lineamientos aprobados por el 6to. Congreso del PCC sobre política energética se plantea: "Potenciar el aprovechamiento de las distintas fuentes renovables de energía: se utilizará el biogás, la energía

eólica, hidráulica y otras; priorizando aquellas que tengan el mayor efecto económico a corto plazo” (Lineamientos del 6to. Congreso del PCC, 2010)

El conocimiento del “estado del arte”, la verificación de los avances realizados en el diseño y la optimización de los equipos y las investigaciones básicas de los procesos dedicados al uso de la biomasa como combustible, en su conjunto ofrecen una excelente oportunidad y el fundamento necesario para el mejoramiento y la innovación tecnológica de los equipos donde se organiza y desarrolla la combustión de los residuos agroindustriales, tales como el aserrín, la cascarilla de arroz y la cáscara de café. Además, la mayoría de los equipos que en la actualidad se emplean para el uso de la biomasa en un proceso de combustión directa, presentan un grupo de insuficiencias aún no resueltas.

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. Por todo lo antes expuesto se plantea el siguiente:

PROBLEMA:

- La combustión en pila de la biomasa sin densificar, que asegure la multitubularidad no ha sido estudiada como alternativa para lograr altos índices de eficiencia.

HIPÓTESIS:

- La Multitubularidad provocada puede ser el principio básico para la combustión y gasificación en pila de capa gruesa de la biomasa para garantizar elevados índices de eficiencia.

OBJETIVO GENERAL:

- Determinar experimentalmente el comportamiento de la Multitubularidad provocada en los índices de combustión en pila de capa gruesa de diferentes biomásas sin densificar.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

1. Determinar las características de la Multitubularidad provocada que aseguren adecuados índices de combustión para diferentes tipos de biomásas.
2. Demostrar la factibilidad técnica, ambiental y económica del empleo de la Multitubularidad provocada como alternativa para la combustión eficiente de la biomasa en pila de capa gruesa.

TAREAS DE INVESTIGACIÓN:

1. Estado documental de la combustión y gasificación en pila de capa gruesa de la biomasa.
2. Diseñar y construir estaciones experimentales para la combustión de biomasa empleando el principio de la Multitubularidad provocada.
3. Planificación de la investigación y selección del plan apropiado a cada objetivo.
4. Desarrollar una metodología para determinar la influencia de las dimensiones geométricas que caracterizan la Multitubularidad provocada.
5. Evaluar técnica, económica y ambientalmente el empleo de esta tecnología.

APORTES:

1. Modelo físico matemático para la determinación del Índice de gasificación
2. Metodología para la determinación de las dimensiones geométricas de la cámara de combustión en aplicaciones específicas de gasificación.
3. Validación experimental del modelo teórico de combustión empleando el principio de la Multitubularidad provocada.
4. Universalidad de la influencia de la Multitubularidad provocada en los incrementos de los índices fundamentales de combustión.
5. Posibilidad de utilizar cualquier biomasa con la garantía de un funcionamiento óptimo de la tecnología en la combustión.
6. La factibilidad económica y medio ambiental del empleo de la Multitubularidad provocada de biomasa en aplicaciones específicas de combustión.

NOVEDAD DEL TRABAJO.

La Multitubularidad provocada constituye el factor determinante en la magnitud de los índices de combustión.

CAPÍTULO I.- ESTADO DOCUMENTAL DEL USO ENERGÉTICO DE LA BIOMASA.

1.1.- LA BIOMASA COMO FUENTE DE ENERGÍA.

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

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

Esta es la fuente de energía renovable más antigua conocida por el ser humano, pues ha sido usada desde que nuestros ancestros descubrieron el secreto del fuego. Desde 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 auto suficientes 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.

1.1.1.- El Recurso biomásico.

Se considera que la biomasa es una fuente renovable de energía porque su valor proviene del sol. A través del proceso de fotosíntesis, la clorofila de las plantas captura su energía y convierte el dióxido de carbono (CO₂) del aire y el agua del suelo en carbohidratos, para formar la materia orgánica. Cuando estos carbohidratos se queman, regresan a su forma de dióxido de carbono y agua liberando la energía que contienen. De esta forma, la biomasa funciona como una especie de batería que almacena la energía solar. Entonces se produce en forma sostenida, o sea, en el mismo nivel en que se consume, esta batería durará indefinidamente, tal y como se muestra en la figura número 1.(Ver Anexo No.1)

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

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

- **Factores geográficos:** debido a las condiciones climáticas de cada región, las cuales indicarán las necesidades de calor que requiera cada zona, y las cuales podrán ser cubiertas con biomasa.
- **Factores energéticos:** por la rentabilidad o no de la biomasa como recurso energético. Esto dependerá de los precios y del mercado energético en cada momento.
- **Disponibilidad del recurso:** este es el factor que hay que estudiar en primer lugar para determinar el acceso y la temporalidad del recurso.

1.1.2.- Utilización de la biomasa.

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

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 (*Nimphaea sp.*) o las algas, para producir combustibles líquidos como el Etanol y el Biodiesel.

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

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

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

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

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

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

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

- **Desechos industriales.**- La industria alimenticia genera una gran cantidad de residuos y subproductos, que pueden ser usados como fuentes de energía, los provenientes de todo tipo de carne (avícola, vacuna, porcina) y vegetales (cáscaras, pulpas) cuyo tratamiento como desechos representan un costo considerable para la industria. Estos residuos son sólidos y líquidos con un alto contenido de azúcares y carbohidratos, los cuales pueden ser convertidos en combustibles gaseosos.
- **Desechos urbanos.**- Los centros urbanos generan una gran cantidad de biomasa en muchas formas, por ejemplo: residuos alimenticios, papel, cartón, madera y aguas negras. La mayoría de los países centroamericanos carecen de sistemas adecuados para su procesamiento, lo cual genera grandes problemas de contaminación de suelos y cuencas, sobre todo por la inadecuada disposición de la basura y por sistemas de recolección y tratamiento con costos elevados de operación.

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

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

1.2. - ALGUNAS CARACTERÍSTICAS DE LA BIOMASA.

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

- **Composición Química y física**.- Estas características determinan el tipo de combustible o subproducto energético que se puede generar, por ejemplo, los desechos animales producen altas cantidades de metano, mientras que la madera puede producir el denominado “gas pobre”, que es una mezcla rica en monóxido de carbono (CO). Por otra parte, las características físicas influyen en el tratamiento previo que sea necesario aplicar.
- **Contenido de humedad (HR)**.- Es la relación de la masa de agua contenida por kilogramo de materia seca. Para la mayoría de los procesos de conversión energética es imprescindible que la biomasa tenga un contenido de humedad inferior al 30%. Muchas veces, los residuos salen del proceso productivo con un contenido de humedad muy superior, que obliga a implementar operaciones de acondicionamiento, antes de ingresar al proceso de conversión de la energía.

- **Porcentaje de cenizas**.- Indica la cantidad de materia sólida no combustible por kilogramo de material. En los procesos que incluyen la combustión de la biomasa, es importante conocer el porcentaje de generación de ceniza y su composición, pues, en algunos casos, esta puede ser utilizada; por ejemplo, la ceniza de la cascarilla de arroz es un excelente aditivo en la mezcla de concreto o para la fabricación de filtros de carbón activado.
- **Poder calórico**.- El contenido calórico por unidad de masa es el parámetro que determina la energía disponible en la biomasa. Su poder calórico está relacionado directamente con su contenido de humedad. Un elevado porcentaje de humedad reduce la eficiencia de la combustión debido a que una gran parte del calor liberado se usa para evaporar el agua y no se aprovecha en la reducción química del material.
- **Densidad aparente**.- Esta se define como el peso por unidad de volumen del material en el estado físico presentado, bajo condiciones dadas. Combustibles con alta densidad aparente favorecen la relación de energía por unidad de volumen, requiriéndose menores tamaños de los equipos y aumentando los periodos entre cargas. Por otra parte, materiales con baja densidad necesitan mayor volumen de almacenamiento y transporte y, algunas veces, presentan problemas para fluir por gravedad, lo cual complica el proceso de combustión y eleva los costos del proceso.
- **Recolección, transporte y manejo**.- Estos son factores determinantes en la estructura de costos de inversión y operación en todo proceso de conversión energética. La ubicación del material con respecto a la planta de procesamiento y La distancia hasta el punto de utilización de la energía convertida, deben analizarse detalladamente para lograr un nivel de operación del sistema por encima del punto de equilibrio, con relación al proceso convencional.

1.3.- 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, sobretodo 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.

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 anaerobia 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.

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 destacan la producción de energía térmica, electricidad,

I.- 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.

II.- Producción de Energía Eléctrica

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

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

III.- 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.

IV.- Producción de gases combustibles

Es una aplicación poco utilizada actualmente que consiste en la descomposición de la biomasa en un digestor para obtener un gas, cuyo compuesto combustible es básicamente metano, pero también contienen nitrógeno, vapor de agua y compuestos orgánicos. El proceso es adecuado para tratar biomasa de elevado contenido en humedad y poco interesante en otras aplicaciones, bien por su calidad o por la poca cantidad disponible.

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

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

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

- ✓ **Homogenización:** Por su propia naturaleza esta presenta características muy heterogéneas, por lo que se supone la adecuación de la biomasa a condiciones de granulometría, humedad, composición todo esto logrado por procesos de trituración, astillado y secado.
- ✓ **Densificación:** Mejora de las condiciones de la biomasa mediante briqueteado o pelletizado, consiguiéndose combustibles con un alto peso específico, lo que mejora las características de almacenamiento y transporte.

1.4.- SITUACIÓN MUNDIAL DE LA BIOMASA.

Más de 2 mil millones de personas siguen contando con combustibles de la biomasa y las tecnologías tradicionales para cocinar y como calefacción. Entre 1,5 y 2,0 mil millones de personas no tienen acceso a la electricidad. La baja eficiencia actual del uso de la biomasa significa que aunque esta, se consume globalmente en una proporción alta, produce sólo un nivel bajo de servicios de energía. En todas sus formas, actualmente la biomasa provee una cantidad aproximada de 1250 millones de toneladas equivalente de petróleo (Tep), lo que representa casi el 14% del consumo anual de energía mundial. Incluso en los países desarrollados, la biomasa se está utilizando cada vez más. En varios de los países desarrollados el uso de esta fuente se ha incrementado sustancialmente, por ejemplo, en Suecia y Austria, el 15% de su consumo de energía primaria está cubierta por la biomasa. Suecia tiene planes para aumentar el uso adicional de la biomasa, y entrar en fase de remplazo de las plantas nucleares y de combustibles fósiles. (Tabla 1.1)(Ver Anexo No.1) E. En EE.UU. la biomasa contribuye aproximadamente a 70 millones de Tep, mientras que la Unión Europea lo hace entre un 20 y 40 millones de Tep al consumo de energía anual. La utilización de la biomasa sustituye parcialmente a los combustibles fósiles y tiene una importancia adicional atendiendo a las preocupaciones del calentamiento global, ya que la combustión de la biomasa tiene el potencial de tener el CO₂ neutral. La biomasa es la mayor fuente de energía de los países en vía de desarrollo, donde se proporciona el 35% de todos los requerimientos de energía. Los combustibles biomásicos utilizados hoy en los países en desarrollo ha sido llamado “El petróleo del hombre pobre” debido al uso directo de la combustión en la cocina doméstica. La biomasa puede ser llamada más apropiadamente “El petróleo de la mujer pobre” ya que esta, junto a los niños en las áreas rurales, gastan cantidad de tiempo colectando madera combustible y sufriendo el ambiente de la polución del aire interior causado por la combustión de la biomasa para calentar y cocinar.

1.4.1.- BIOMASA - Algunos datos básicos.

- ✓ El contenido total de la biomasa del mundo - **1880 billones de toneladas.**
- ✓ Masa total en los bosques tropicales -**1,03 billón toneladas.**

- ✓ Masa total en los bosques templados, sabana y la tundra - **790 billones de toneladas.**
- ✓ El contenido total de la biomasa marina - **4 billones de toneladas.**
- ✓ Per cápita de biomasa terrestre - **310 toneladas.**
- ✓ Energía almacenada en la biomasa terrestre - **25 000 EJ.**
- ✓ La producción neta anual de la biomasa terrestre - **400 billones de toneladas.**
- ✓ Cambio de almacenamiento de energía por biomasa de la tierra - **3000 EJ / año (95 TW).**
- ✓ El consumo total de todas las formas de energía - **400 EJ / año (12 TW).**
- ✓ El consumo de energía de la biomasa - **55 EJ / año (1.7 TW).**

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

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

1.5.- VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL APROVECHAMIENTO DE LA BIOMASA.

1.5.1.- Ventajas.

- La biomasa es una fuente renovable de energía y su uso no contribuye a acelerar el calentamiento global; de hecho, permite reducir los niveles de dióxido de carbono y los residuos de los procesos de conversión, aumentando los contenidos de carbono en la biosfera.
- La captura del metano de los desechos agrícolas y los rellenos sanitarios, y la sustitución de derivados del petróleo, ayudan a mitigar el efecto invernadero y la contaminación de los acuíferos.

- Los combustibles biomásicos contienen niveles insignificantes de sulfuro y no contribuyen a las emanaciones que provocan “lluvia ácida”.
- La combustión de biomasa produce menos ceniza que la de carbón mineral, puede usarse como insumo en los suelos y como aditivo para la obtención de materiales de la construcción.
- La conversión de los residuos forestales, agrícolas y urbanos para la generación de energía reduce significativamente los problemas que trae el manejo de estos desechos.
- No está sujeta a las fluctuaciones de precios de energía, provocadas por las variaciones en el mercado internacional de importaciones de combustibles.
- El uso de los recursos de biomasa puede incentivar las economías rurales, creando más opciones de trabajo y reduciendo las presiones económicas sobre la producción agropecuaria y forestal.
- Las plantaciones energéticas pueden reducir la contaminación del agua y la erosión de los suelos, así como favorecer el mantenimiento de la biodiversidad.

1.5.2.- Desventajas.

- Por su naturaleza, la biomasa tiene una baja densidad relativa de energía, es decir, se requiere disponibilidad de grandes volúmenes para producir potencia, por lo que el manejo y transporte se encarecen y se reduce la producción neta de energía. La clave de este problema es ubicar el proceso de conversión cerca de las fuentes de producción de biomasa.
- Su combustión incompleta produce materia orgánica, monóxido de carbono (CO) y otros gases. Si se usa combustión a altas temperaturas, también se producen óxidos de nitrógeno. A escala doméstica el impacto de estas emanaciones sobre la salud familiar es importante.
- La producción y procesamiento requiere importantes insumos, como combustibles y fertilizantes, por lo cual el balance energético es reducido en el proceso de conversión.
- Aún no existe una plataforma económica y política generalizada para facilitar el desarrollo de tecnologías de biomasa.

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

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

1.6.- ESTADO DEL ARTE.

1.6.1.- Problemas asociados con la utilización de la biomasa como combustible.

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

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

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

- Uso de aditivos.
- Uso de materiales alternativos en el caso de lechos Fluidizados.
- Mezcla de biomasa con otros combustibles, como carbón, lignito.
- Briquetas tubulares y multitubulares.

1.6.2.- Modelos de combustión de sólidos.

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

- Modelo de núcleo sin reaccionar (SCM).
- Modelo de conversión uniforme (UCM).
- Modelo granular (GPM).
- Modelo de núcleo fraccionado (CCM).
- Modelo de poros no uniformes (CVM).
- Modelo de descomposición térmica (TDM).
- Modelo de cambio de fase (PCM).
- Modelo Avrami.
- Modelo de núcleo sin reaccionar para reacciones de múltiples pasos.
- Modelo granular para reacciones múltiples de partículas porosas.
- Modelo de poros no uniforme para reacciones múltiples de partículas que se convierten en más porosas en el interior del reactor.

Para enfrentar el estudio de la combustión de sólidos es necesario separar; sin desligar; el fenómeno físico en dos partes, el aspecto químico; relacionado con la cinética química de la reacción exotérmica; y los transporte de calor y masa en la capa límite.

El método, para analizar el aspecto físico del problema utilizado en este trabajo es el método de la capa límite, este método plantea que existe una capa límite térmica, una dinámica y una de concentración.

1.6.3. Experimentos de combustión de briquetas. J.L. Míguez Tabarés y L.M. López González ¹, hacen un estudio que sirvió como un eslabón más, utilizado por Irving Fundora en la parte experimental de su Tesis de Maestría; en este artículo se analiza la reactividad del char en briquetas macizas lignocelulósicas españolas. Llevando a cabo un "termo balance" para determinar las características de la combustión y reactividad de este tipo de briquetas con masas iguales. En este trabajo se demostró, que para el caso de estas briquetas, se encontraron que las tasas específicas de reacción dependen del tipo de briqueta (densidad, diámetro) y el nivel de los inquemados. Las tasas más altas de reactividad fueron encontradas en diámetros pequeños, y briquetas menos densas.

J. Cogollo y D. Verdecia ², utilizando un modelo de núcleo sin reaccionar para partículas cilíndricas de tamaño constante desarrollado por Yagi y Kunii (1955) se incorporó al mismo los fenómenos de transferencia de calor y masa que tienen lugar en los procesos de combustión.

Se obtuvo después de una simulación, un resultado teórico apropiado a la combustión de briqueta cilíndricas tubulares de combustibles sólidos, en lo referente a índices fundamentales de combustión, con un mayor grado de significación, el índice de eficiencia. También se analizó las fases controlantes que intervienen durante el proceso.

Se demostró, según los resultados experimentales de la simulación que los mayores valores de transferencia de masa se logran para briquetas tubulares con altas relaciones de radio y bajas densidades, siendo estas las más adecuadas para la combustión, ya que son las que de mejor forma llegan a transformar mayor cantidad de su masa en energía, por lo que se puede plantear que las bajas densidades favorecen la combustión de biomasa cañera, lo cual se ve mejorado si se añade a lo anterior relaciones de radios altas, también se pudo observar que las briquetas macizas presentan valores de transferencia de masa menores que las tubulares de su misma

¹ J.L. Tabarés Míguez y L.M. González López, "Combustion Behavior of Spanish Lignocellulosic Briquettes.," *Taylor & Francis* (2006). www.informaworld.com/index/741973136.pdf -

² David. Verdecia T., "Estudio teórico de la combustión de briquetas cilíndricas de biomasa cañera." (Tesis Maestría., Universidad de Cienfuegos., 2002).

densidad y que las más deficientes son aquellas para las cuales la densidad es alta, por lo que se recomienda que se utilicen briquetas tubulares con bajas densidades por encima de cualquier otro tipo de briquetas y como última opción las macizas con altas densidades.

Como se ve, estos análisis sirven de punto de partida para tener en cuenta y validar experimentalmente con mayor detalle lo que sucede en las briquetas, de distintas biomásas e incluyendo el análisis de las briquetas multitubulares.

P.Fundora,³, realizó un estudio preliminar del comportamiento en combustión de las briquetas tubulares de paja de caña, determinando el índice de combustión promedio o pérdida de masa por unidad de tiempo (ICP) lo que demuestra la influencia significativa de las dimensiones geométricas, particularmente el diámetro del conducto (d) y el espesor [$S = (D-d)/2$] de las briquetas tubulares, en cuanto a la combustión, y ello constituye un motivo para profundizar en los índices de combustión en briquetas tubulares con diferentes biomásas, formas geométricas y diferentes grados de densificación. De aquí se tomaron algunos aspectos para el análisis del comportamiento de briquetas tubulares y multitubulares de la paja caña y aserrín de madera en la combustión. Determinando Índice de Combustión Promedio (ICP), velocidad específica de reacción (k) y rango de reactividad (Ra) y la influencia de las relaciones de radio.

1.6.4.- Modelo de núcleo sin reaccionar para partículas cilíndricas de tamaño constante.

El modelo de núcleo sin reaccionar es uno de los muchos modelos que tratan de analizar como transcurren; desde el punto de vista cinético; las reacciones de determinados procesos químicos en el interior de un reactor, este modelo brinda la posibilidad de conocer; de manera aproximada; los tiempos de cada una de las fases que componen los procesos tratados, de la misma manera se puede determinar cuál de estas fases realiza el papel controlante de todo el proceso y brinda una idea de la

³ Pedro Fundora Beltrán, “Estudio del proceso de densificación gradual de la paja de caña para el perfeccionamiento de su proceso tecnológico.” (Tesis Doctoral, Universidad de Cienfuegos., 2003).

velocidad de las reacciones que ocurren. En este caso solo se analiza la briqueta hueca que es la que más se acerca al problema.

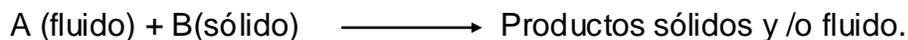
Este modelo fue creado por Yagi y Kunii (1955), considerando que durante la reacción se presentan sucesivamente las cinco etapas siguientes:

- Etapa 1: Difusión del reactante gaseoso A hasta la superficie del sólido a través de la película gaseosa que le rodea.
- Etapa 2: Penetración difusión de A, a través de la capa de ceniza hasta la superficie del núcleo que no ha reaccionado o superficie de reacción.
- Etapa 3: Reacción del reactante gaseoso con el sólido en la superficie de reacción.
- Etapa 4: Difusión de los productos gaseosos formados a través de la capa de ceniza hacia la superficie exterior del sólido.
- Etapa 5: Difusión de los productos gaseosos de reacción a través de la capa gaseosa hacia el seno del fluido.

Normalmente se producen todas las etapas; por ejemplo si no se forman productos gaseosos o si la reacción es irreversible, las etapas 4 y 5 no contribuyen directamente a la resistencia de la reacción.

Además, las resistencias de las distintas etapas suelen ser muy diferentes, en tales casos, como se ha apuntado se ha de tener en cuenta que la etapa que presente mayor resistencia, es decir la etapa más lenta constituye la etapa controlante de la velocidad.

A continuación se presentan la ecuación de conversión para reacciones elementales irreversibles, para ello no se van a considerar las etapas 4 y 5, se supondrán partículas cilíndricas huecas. Se utilizó la reacción elemental planteada al principio:



Se denominará C_{Ag} , la concentración del A en el seno del gas y C_{As} a la concentración de A en la superficie del sólido B.

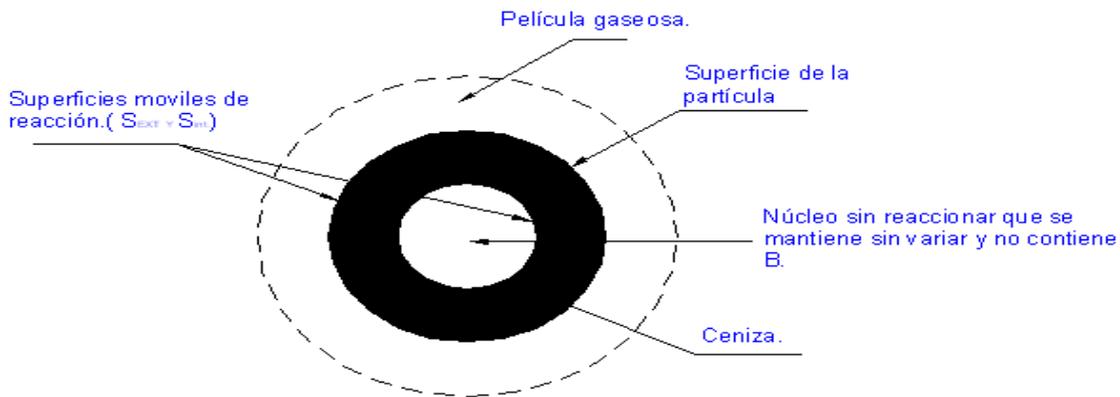


Fig. 1.5.- Comportamiento de una briqueta tubular, con núcleo sin reaccionar.

Un análisis de los tiempos de combustión obtenidos mediante el modelo cinético arroja que tanto para la briqueta maciza como para la briqueta tubular la etapa controlante de todo el proceso de combustión es la **ceniza**, lo cual está en concordancia con la teoría de la combustión de combustibles sólidos, seguido por la difusión a través de la capa gaseosa y como último lugar la reacción química como controlante, aquí también se manifiesta que si se mejora la difusión del oxígeno hacia el interior de las briquetas la combustión mejoraría, lo que se ve cuando se varía la densidad y se puede observar como para bajas densidades la eficiencia aumenta.

1.7.- CINÉTICA DE LA COMBUSTIÓN.

Una vez que se introduce el combustible en el reactor tiene lugar la pirolisis provocando la ruptura de los componentes iniciales del combustible y dando lugar a fracciones volátiles y carbono fijo. Aquí se introduce la primera hipótesis, ya que se va a suponer qué cantidad de agua en los volátiles es la máxima que se puede formar en función de la cantidad de oxígeno e hidrógeno existente en la composición inicial del combustible.

Una vez que se termina la pirolisis, se considera la posibilidad de que los productos obtenidos puedan seguir dos procesos diferentes. Esta distinción depende de la cantidad de comburente suministrada. Si el comburente se suministra en defecto estaremos en presencia de la gasificación, y el proceso tendrá lugar en un gasificador.

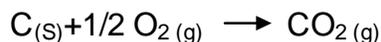
Por el contrario si el comburente se suministra con exceso estaremos en presencia de la combustión, y la misma se desarrolla en un combustor.

Las reacciones más frecuentes que se dan en un proceso de combustión de biomasa, sin olvidar por supuesto, la diferencia entre reacciones heterogéneas y homogéneas son:

Para el caso de gasificación como se puede apreciar en la figura 1.69 (Ver Anexo No.2) participarán todas las reacciones y se tendrán en cuenta las siguientes consideraciones:

- La diferencia entre el orden de magnitud de la reacción $C_{(s)} + O_{2(g)} \rightarrow CO_{2(g)}$ con respecto a las otras dos reacciones heterogéneas nos permite considerarla inmediata.
- Como el aire de alimentación es insuficiente para que se consuma todo el C inicial, el C sobrante de la primera reacción y el CO_2 formado, junto con el resto de los productos de la pirolisis, evolucionarán según las otras dos reacciones heterogéneas.
- Finalmente, igual que en el caso de la combustión, los productos de la cinética heterogénea reaccionarían siguiendo la cinética de las reacciones homogéneas.

Una vez finalizada la pirolisis, tiene lugar la oxidación del carbono fijo, que se había supuesto inmediata. Esto permite obtener los productos de la reacción utilizando los principios de masa y la energía.



De esta manera se puede calcular las concentraciones de cada especie involucrada en el proceso de combustión, hay que aclarar que los resultados de todos estos cálculos darán las concentraciones después de culminar la pirolisis. En este punto vuelve a confluir los dos procesos, tanto el de gasificación como el de combustión. En este punto después de haber tenido lugar la reacción de oxidación del carbono fijo (reacción heterogénea) se producen las reacciones homogéneas ya descritas, fig. 1.7. (Ver Anexo No.3)

1.8.- INFLUENCIA DE LA DENSIDAD Y LA GEOMETRÍA DE LA BRIQUETA EN LA COMBUSTIÓN.

Irving Fundora en su tesis de maestría realizó un diseño de experimento con vistas a determinar la influencia de la densidad y la geometría de la briqueta en la combustión.

Los factores independientes considerados fueron:

1. Densidad de la briqueta (ρ)
2. Relación radio interior entre radio exterior de la briqueta (α)

Los factores de respuestas:

1. R_e/R_{eq} (variación del radio exterior)
2. r_i/r_{iq} (variación del radio interior)
3. W/W_0 (variación de la masa a dimensional)
4. T/T_0 (variación del tiempo a dimensional)
5. λ (variación del coeficiente de exceso de aire)

Entre los resultados obtenidos en este experimento se encuentran:

- para briquetas tubulares con una relación entre radios próxima a 1 se logran las mayores transferencias de masa al medio, por lo cual, comparando dos briquetas; una tubular y una maciza para iguales valores de baja densidad, la combustión de la tubular se realizará de forma más completa por lo tanto más eficiente.
- para tiempos cercanos a cero la influencia de la densidad sobre la temperatura de los productos al final de las reacciones homogéneas es casi nula para valores de relación de radios próximos a los medios (0.25).
- El análisis de coeficiente de exceso de aire corrobora lo anteriormente expuesto pues se tiene que el mismo permanece casi constante para valores medios de la relación entre radios sin tener influencia sobre el mismo los valores de densidad.
- los mayores valores de radio exterior quemados en comparación con el radio exterior inicial se logran para briquetas tubulares con altos valores de relación

entre radios y bajas densidades, lo cual reafirma la eficiencia de la briqueta tubular sobre la maciza.

- también reafirma que valores bajos de densidad permite que el proceso de combustión se realice más eficiente; y se dice más eficiente cuando se logra convertir una mayor cantidad de masa en energía, en un mismo intervalo de tiempo.

1.9.- CARACTERÍSTICAS TÉRMICAS DE LAS BRIQUETAS CILÍNDRICAS TUBULARES DE BIOMASAS.

1.9.1.- Determinación de las magnitudes geométricas de las briquetas tubulares y multitubulares.

La figura 1.8 (Ver Anexo N.4) representa un corte transversal de una briqueta cilíndrica tubular de biomasa, donde se distinguen las dimensiones geométricas diámetro del conducto (d), Diámetro exterior de la briqueta D y el espesor δ .

La figura 1.9 (Ver Anexo No.4) representa un corte transversal de una briqueta cilíndrica multitubular de biomasa, donde se distinguen las dimensiones geométricas, diámetro exterior de la briqueta (D), diámetros de los conductos (d), diámetro del conducto central (d_1), espesor entre los conductos, en la dirección radial y circunferencial (2δ) y espesor de los conductos más alejados del centro de la briqueta con su límite exterior (δ).

El diámetro de la briqueta multitubular es una función del diámetro de los conductos, del espesor equivalente a una briqueta tubular δ y del número de ubicación respecto al conducto central (n).

(1.7)

Donde:

d – diámetro del conducto (mm)

δ – espesor para una briqueta (mm) o alrededor de cada conducto de diámetro (d)

n – Número natural (1, 2, 3; ubicaciones de los conductos respecto al conducto central)

Sí se dan las dimensiones d, δ y n se determina el diámetro (D) de la briqueta multitubular correspondiente.

Sí se conoce el diámetro (D) de la briqueta multitubular, conviene determinar el número natural (n) de ubicaciones de los conductos así como el número de conductos por ubicaciones, para ello se debe asumir el diámetro de los conductos (d) y el espesor (δ).

$$\text{—————} \tag{1.8}$$

$$\text{—————} \tag{1.9}$$

Donde:

Rn – radio de las circunferencias de ubicaciones de los conductos (mm)

h – paso entre los conductos.

$$\tag{1.10}$$

Es importante señalar que para producir las briquetas cilíndricas en este tipo de instalación se hace imprescindible la utilización de una briqueteadora hidráulica y varios dispositivos, que hacen este proceso de densificación muy costoso.

1.9.2.- Eficiencia del sistema térmico.

Todos los combustibles, presentan una energía potencial caracterizada por su valor calórico inferior, y donde participan otros factores como: la masa, las dimensiones, la humedad, etc. Al utilizar un sistema de combustión dado, solo una parte de estas potencialidades es aprovechable, de modo que, resultará importante definir un índice que relacione, la energía útil con la energía potencial del combustible.

Eficiencia del sistema térmico:

$$\eta_{sc} = \frac{Q_a}{Q_{cb}} \cdot 100 \tag{1.11}$$

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

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

$Q'cb$ -Calor cedido por la briqueta, kJ/kg

$$Q'_a = C_{pa} \cdot (T_f - T_0) + \left(1 - \frac{m_f}{m_a}\right) \cdot v \quad (1.1)$$

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

T_f -Temperatura final del agua, °K. $T_f = 373$ °K.

T_0 -Temperatura inicial del agua, °K. $T_0 = 300$ °K.

m_a - Masa inicial de agua, kg.

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

v - Calor latente del agua, para la temperatura de 100°C o 373°K:

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

$$Q'cb = Vcb \text{ (kJ/kg)} \quad (1.2)$$

Donde: Vcb - Valor calórico inferior del combustible utilizado [kJ/kg].

Las briquetas tubulares y multitubulares tienen un comportamiento en la combustión que las acerca más a un proceso de gasificación, que a un proceso termoquímico de combustión directa. La combustión de los volátiles que se generan en el proceso de combustión de las briquetas constituye el aporte fundamental de energía de estas y al finalizar esta fase de la combustión, el aporte de energía está determinado por el carbón libre, lo que resulta insuficiente para cualquier aplicación importante.

La respuesta de las briquetas tubulares y multitubulares en la combustión, motivados por la transformación gaseosa del combustible, hace que entre en contradicción con los modelos anteriores de combustión ya que posibilita la regulación de la misma y la garantía de un exceso de aire estequiométrico, correspondiente a la combustión de los gases combustibles. Por lo que al utilizar el valor calórico del combustible sólido en la

evaluación de la eficiencia del sistema térmico no aporta la respuesta deseada de este índice.

En el gráfico de la figura 1.10 (Ver Anexo 5) se muestra la correspondencia entre el comportamiento del Índice de Combustión Promedio (ICP) y la potencia térmica (N_{briq}) lo que corrobora la efectividad de las briquetas tubulares y multitubulares en su aporte energético, el cual aumenta con el incremento de ICP..

1.9.3.- Combustión en cámara cerrada de briquetas tubulares y multitubulares.

Los resultados obtenidos hasta el momento en los experimentos realizados por I. Fundora al respecto corroboran ciertos criterios que se han estado valorando y que en síntesis son los siguientes:

- Los factores independientes a tener en cuenta durante la combustión son: diámetro exterior de la briketa (D), la relación de diámetros (d/D), la densidad de la briketa (ρ) y la densidad natural (ρ_0).
- Los factores dependientes: potencia entregada por el combustible (N_{briq}) y la eficiencia del sistema de combustión (η_{SC}).
- Es destacable la influencia significativa del diámetro exterior de las briquetas, así como la relación de los diámetros (d/D) que al aumentar, incrementan la potencia térmica entregada por las briquetas, la densidad, aún cuando aparece en la correlación, su nivel de significación es inferior a los parámetros independientes analizados.
- No tiene influencia el tipo de biomasa, ni la longitud de las briquetas en los resultados de eficiencia.
- Los factores que influyen en la potencia térmica, también influyen en la eficiencia del sistema de combustión. La eficiencia media resultó ser ($\eta_{SC}=43\%$).

1.10.- Conclusiones parciales.

1. El modelo teórico de combustión de núcleo sin reaccionar que considera el efecto de las fases controlantes y la influencia de la transferencia de calor y masa,

tiene un mayor acercamiento al comportamiento de las briquetas tubulares y macizas en combustión.

2. El comportamiento de las briquetas tubulares desde el punto de vista del índice de combustión promedio (ICP) con diferentes densidades y relaciones de diámetros d/D demuestra la marcada influencia de estas variables y posibilita asegurar un mejor comportamiento en favorables condiciones de combustión, (cámaras cerradas eficiente).
3. El modelo teórico propuesto describe adecuadamente cada uno de los fenómenos que se presentan durante la combustión de briquetas cilíndricas macizas y tubulares independientemente del tipo de biomasa de que se fabriquen.
4. Se demuestra que la combustión es más eficiente en briquetas tubulares con relaciones de radio interior entre radio exterior altas y densidades bajas, las cuales pueden fabricarse utilizando briqueteadoras hidráulicas.
5. Las briquetas tubulares y multitubulares con Índices de Combustión Promedio (ICP) superior a 3,5 (g/min) presentan adecuadas condiciones de inflamabilidad y de combustibilidad, lo cual posibilita su funcionamiento en cualquier condición de combustión.
6. El incremento de la relación de diámetros (d/D) coincide con una disminución de la relación $\beta = (\delta/d)$ y es un factor común, y con elevado nivel de significación en los índices fundamentales de combustión superando a la influencia del diámetro exterior, la longitud y la densidad de las briquetas.
7. La influencia significativa de las dimensiones geométricas de las briquetas tubulares y multitubulares sobre el tipo de biomasa y la densidad es un resultado que puede generalizarse a cualquier biomasa o combustible sólido densificado.
8. La tendencia a la gasificación de las briquetas tubulares y multitubulares incrementa con la relación (d/D), la longitud (L) y en las biomásas no leñosas, en cámara de combustión cerrada influye también el incremento del diámetro exterior y la densidad.

9. El aporte energético fundamental de las briquetas tubulares y multitubulares, está determinado por la combustión de los volátiles, ello posibilita la regulación de la combustión según la potencia térmica requerida en la aplicación.

10. Existe una relación directa entre el índice de combustión promedio (ICP) la potencia disipada por el combustible (N_{briq}) y la eficiencia del sistema de combustión (η_{SC}).

CAPÍTULO 2. EVALUACIÓN TÉRMICA DE LA MULTITUBULARIDAD COMO TECNOLOGÍA EFICIENTE PARA LA COMBUSTIÓN DE BIOMASAS.

Introducción

Para realizar la evaluación térmica de la multitubularidad como una tecnología eficiente se procedió a el diseño de un prototipo de Estufa dirigido a satisfacer en lo posible los 10 Principios Fundamentales que se exigen en una tecnología de combustión para ser eficiente, considerándola como un sistema térmico que tome en cuenta el combustible, la tecnología de combustión y la aplicación, si todos estos factores se manejan adecuadamente, los resultados finales son los más favorables. No obstante si se asegura que la tecnología resulte apropiada para garantizar la combustión eficiente del combustible sólido en cuestión, es un gran paso para la eficiencia del sistema térmico. Es importante resaltar que los 10 principios de diseño del Dr. Larry Winiarski (Ver Anexo No.1) han sido utilizados por varias organizaciones para crear estufas exitosas. Sin embargo hay una serie de interrogantes las cuales serían la guía a seguir en la presente investigación:

- ✓ ¿Qué ocurrirá cuando se utilicen otros tipos de combustibles sólidos, como las biomosas no leñosas?
- ✓ ¿Qué modificaciones se requerirán en la tecnología, para que sea factible el funcionamiento con cualquier tipo de combustible?

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

2.1.- Prototipo Estufa.

La Estufa está formada por 3 partes fundamentales (Fig.2.13) o por 4 partes fundamentales (Fig.2.14), cuando se utilizan ó recuperan los gases calientes que aún salen del cuerpo principal (1).

1. Cuerpo de la Estufa.
2. Hornilla principal recuperativa para la olla.
3. Chimenea.
4. Hornilla plana Complementaria.

La Estufa con la Chimenea, conectada en la versión de una hornilla (Fig.2.13), alcanza una altura de 1,89 m y un área media de 0,3 m² y en la versión de 2 hornillas (Fig.2.14) 2,03 m de altura y un área media de 0,43 m², lo que la hace bastante compacta.

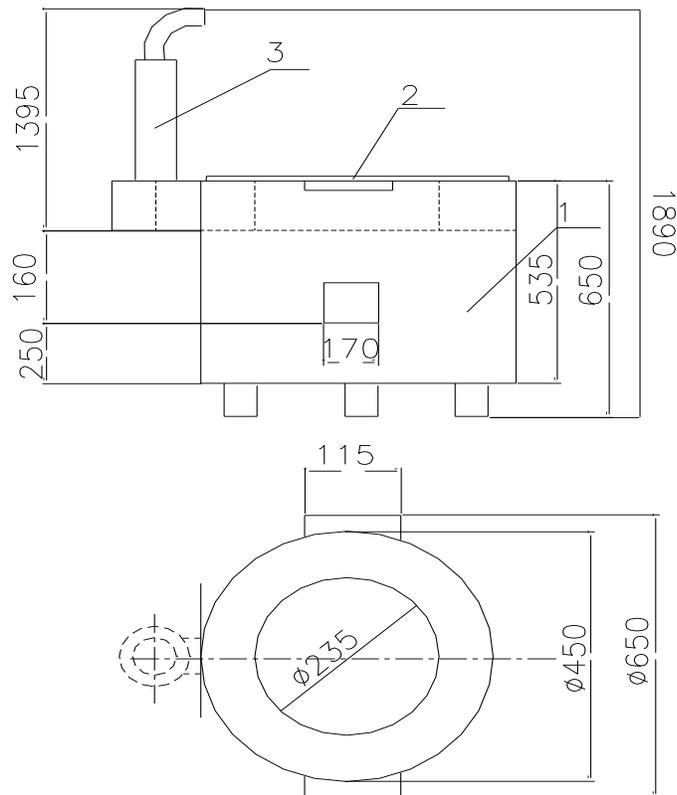


Fig. 2.13 Estufa de una hornilla. (Cuerpo principal de la estufa 1, Hornilla recuperativa 2, chimenea 3)

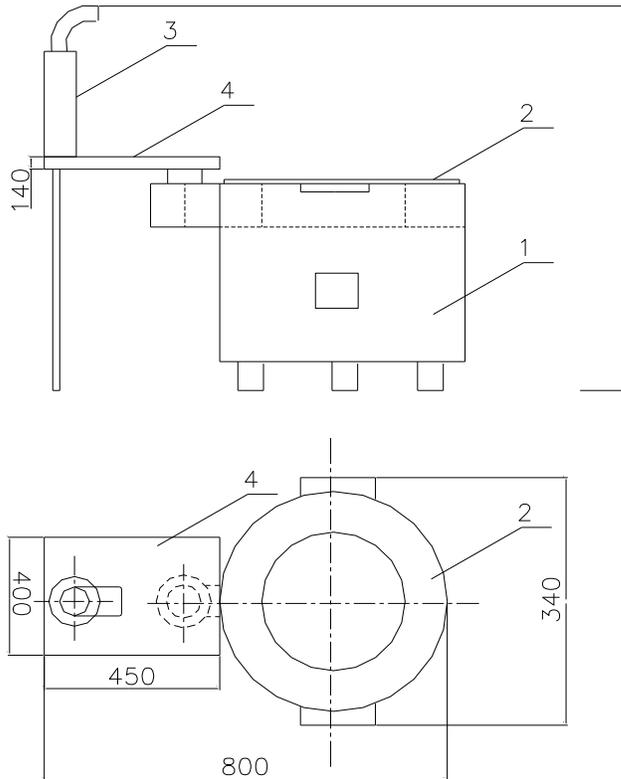


Fig. 2.14 Estufa de dos hornillas. (Cuerpo principal de la estufa 1, Hornilla recuperativa 2, Chimenea 3, Hornilla complementaria 4.)

1. El cuerpo de la estufa (Fig. 2.15) está constituido por un depósito cilíndrico metálico (1) de 2 mm de espesor, cerrado en su parte inferior por un casquete esférico con un orificio de 95mm de diámetro, para evacuar las cenizas y para la ignición del combustible colocado en una parrilla, sobre los soportes (4), en su posición media se localiza la ventana para la alimentación lateral del combustible con una sección rectangular de (120 x 140)mm y en su porción superior, un conducto acodado (5) de 65mm de diámetro, para la evacuación de los gases de la combustión.

El cilindro metálico (1) se encuentra aforado con lana de vidrio de 40 mm de espesor (2) y recubierta exteriormente por una lamina de acero galvanizado (3) de 0,5mm de espesor. La relación entre la altura de la estufa y su diámetro interior es de 1,4mm, las recomendaciones, para un funcionamiento adecuado y con buena eficiencia en la combustión, plantean una relación igual o menos 3 veces la altura respecto al diámetro.

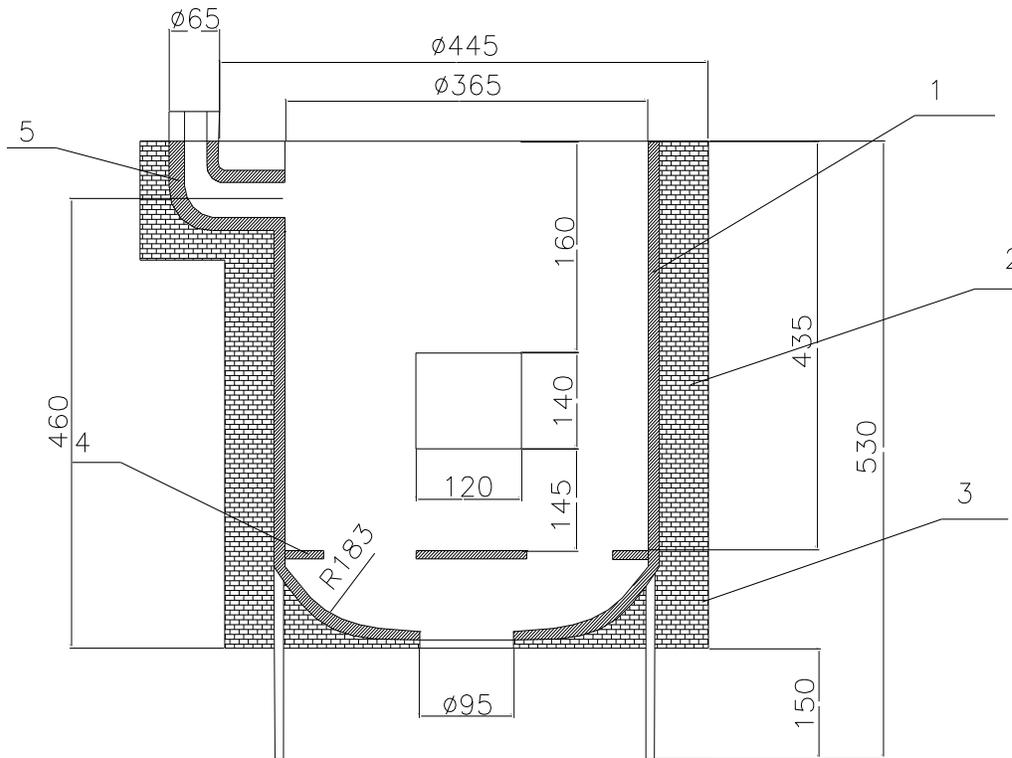


Fig. 2.15 Cuerpo principal de la estufa. (Depósito cilíndrico metálico 1, aislamiento 2, cubierta protectora metálica 3, soporte de la parrilla 4, conducto de evacuación de los gases de la combustión 5)

2. Hornilla principal de la estufa. (Fig.2.16)

- a. Hornilla plana con orificio central.
- b. Hornilla recuperativa con aletas para la orientación lateral de los gases de combustión.
- c. Sin hornilla (Ollas de diámetro exterior superior a 235mm).

a) **Hornilla plana con orificio central** una placa circular plana de 425mm de diámetro exterior y un espesor de 14mm con un orificio central de 150mm de diámetro, posibilita utilizar ollas de diámetros superiores a 235mm, sartenes de poca altura y cafeteras, siempre que se obstruya el orificio central de la hornilla o se utilice el espacio restante disponible.

b) **Hornilla hendida para recepción de la olla**, con aletas para la orientación lateral de los gases en la combustión (**Hornilla recuperativa**).

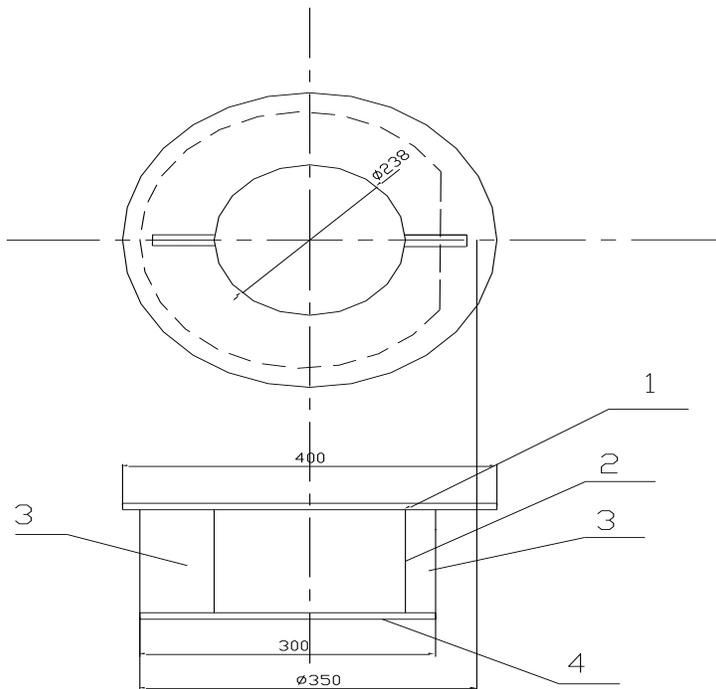


Fig. 2.16 Tapa superior 1, Receptáculo cilíndrico 2, Derivadores del flujo de gases 3, Placa de 2.4 Hornilla principal recuperativa. Cierre inferior 4.

La hornilla recuperativa, consta de la tapa superior de cierre del conducto de gases laterales (1) que además sirve de soporte a todo el conjunto y a la olla que se debe colocar en el recipiente a receptáculo cilíndrico (2) de 238mm de diámetro interior y una profundidad de 120mm, contruidos de láminas de acero de 2mm de espesor. En la parte lateral exterior de este ultimo están situado los derivadores del flujo de gases de la combustión (3) y en el fondo la placa de cierre inferior (4) que sirve de fondo al receptáculo a la vez que obliga a los gases de la combustión en la cámara del cuerpo a moverse en el sentido opuesto al del conducto de evacuación de los gases (chimenea).

La superficie exterior del receptáculo para la olla y el diámetro interior del cuerpo cilíndrico metálico de la estufa (1) (Fig. 2.15) la tapa superior de cierre y soporte (1) y la placa de cierre inferior (4) (Fig. 2.16) forman un conducto de una sección rectangular de

(60x120) mm y una área de $72 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$ alrededor del receptáculo (2) (Fig. 2.16) que conduce de forma bifurcada, los gases de la combustión a la chimenea.

c) **Sin hornilla** (Olla directamente sobre el cuerpo de la estufa (1) (Fig. 2.15).

Cuando la olla es de dimensiones superiores a los 300mm conviene no emplear las opciones (a) y (b), ya que la opción (a) es factible, pero se pierde en eficiencia térmica y la opción (b) es térmicamente inapropiada para ser utilizada, dado a su geometría compleja.

En esta variante no se utiliza tampoco la chimenea. Sin embargo, es destacable la flexibilidad que posee la estufa para adecuarse a cualquier requerimiento de la olla de cocción de alimentos.

3. Chimenea externa.

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

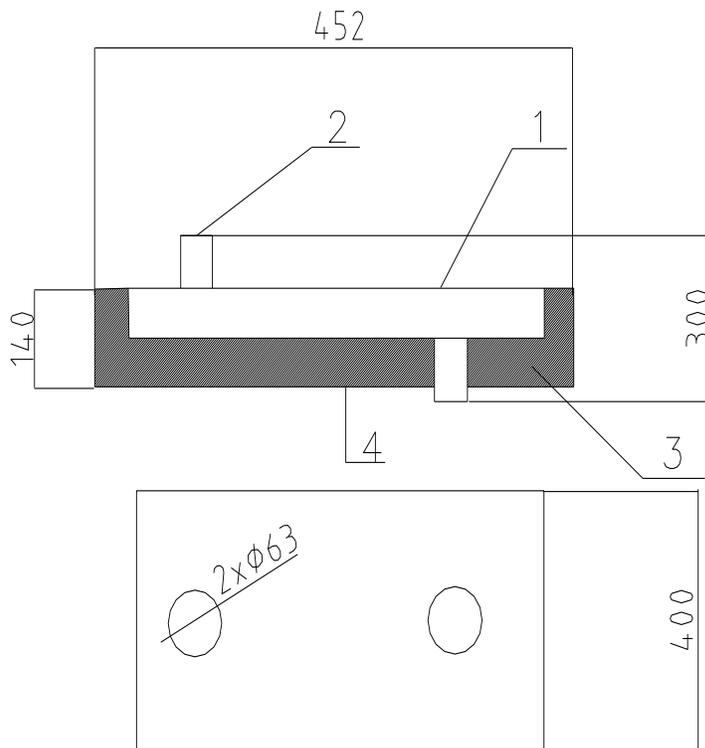


Fig. 2.17 Hornilla plana complementaria.(Cuerpo metálico1, Conductos metálicos de recepción y evacuación de gases 2, Aislamiento de asbesto cemento 3, Lámina metálica (recubrimiento).

La hornilla plana complementaria está constituida por un cuerpo (1) formado por laminas de 2mm de acero al carbono, que forman un deposito cerrado de (60x300x350) mm $6,3 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ de volumen físico con dos conductos (2) de diámetro interior 50mm y longitud sobre el cuerpo (1) de 120mm, son los encargados de la evacuación de los gases calientes de la combustión del cuerpo de la estufa a la cámara de expulsión que representa el interior del cuerpo de la hornilla complementaria (1) (Fig. 2.17) y en sentido opuesto el otro conducto (2) se conecta con la chimenea externa para la evacuación de los gases a la atmósfera. El aislamiento (3) en todas las superficies excepto la superior del cuerpo de la hornilla complementaria (1) asegura en parte la recuperación del calor de los gases que salen del cuerpo de la estufa posibilitando que la superficie superior de la hornilla complementaria plana pueda ser utilizada en la mantención de la temperatura de los alimentos. Los gases de escape son expulsados al exterior (Por la chimenea) a una temperatura inferior a 100°C .

4- Parrilla para el combustible.

Este conjunto constituye la columna vertebral del funcionamiento de la estufa y puede ser modificada para adecuarse a las características físicas del combustible. Su principal misión está en la dosificación del aire de alimentación que entra por el orificio situado en el fondo del cuerpo de la estufa (Fig. 2.15) para asegurar la combustión primaria (Aire que hace contacto físico con el combustible de la parrilla) y la combustión secundaria (aire que entrando por el conducto central de la parrilla, sirve de comburente para la combustión de los gases generados de la combustión primaria, en la parte superior de la cámara de combustión). Puede satisfacer dos alternativas de combustibles sólidos.

- A. Parrilla para la combustión de leña, carbón y briquetas de biomasa residuales.
- B. Parrilla para la combustión de biomasa residuales en sus estados naturales (hierba seca, aserrín de madera, paja de cereales etc.).

A. Parrilla para la combustión de leña, carbón y briquetas de Biomasa residuales.

Los combustibles sólidos (Leña en trozos, carbón y briquetas macizas de biomasa residuales) deben colocarse sobre la parrilla (2) de la Fig. 2.17 en cualquier dirección y ocupando el espacio entre la parrilla (2) y el conducto (1), hasta una altura de 240mm como máximo, desde el nivel de la parrilla(2), esta disposición del combustible asegura la multitubularidad necesaria para la gasificación productiva del mismo. Cuando el combustible utilizado es briquetas tubulares o multitubulares, resulta muy favorable que se coloquen de forma vertical con los conductos alineados, aunque la afectación de la combustión no es significativa, si se colocan con cualquier orientación.

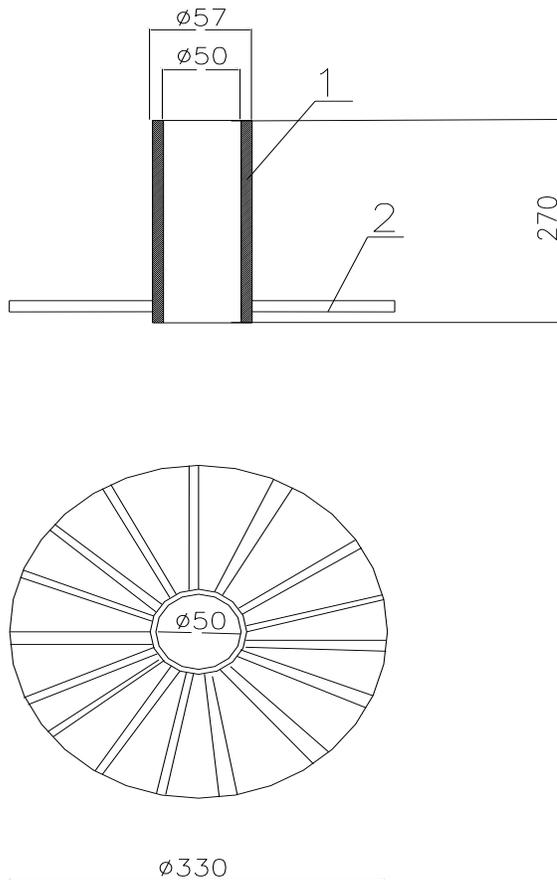


Fig. 2.18 Parrilla para la combustión de leña, carbón y briquetas de biomasa residuales.
(Conducto para aire secundario 1, Parrilla para el combustible 2.)

B. Parrilla para Biomasa residuales sin densificar (hierba seca, aserrín de madera, paja de cereales, etc.)

Los combustibles a granel (Sin densificar), se colocan en los espacios dejados por los gasificadores (2) (Fig. 2.19) y el conducto de aire secundario (1), sobre la parrilla (3) hasta una altura que no sobrepase la altura de los gasificadores (2), de ser posible, presionar el combustible, para forzarlo a penetrar en los espacios entre los diferentes conductos, sobre todo si las biomasa utilizada son de elevada granulometría y poca densidad natural.

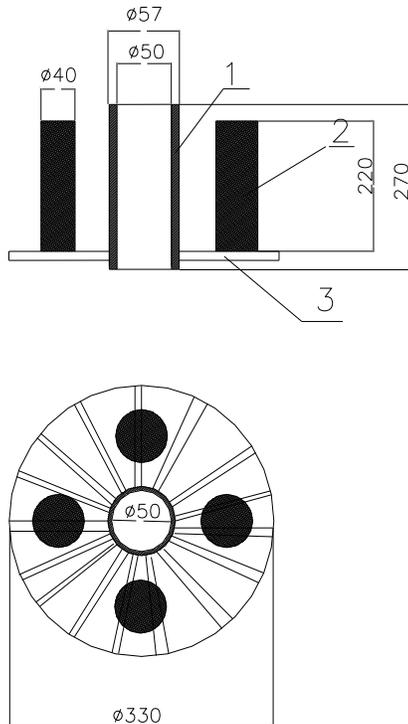


Fig. 2.19 Parrilla de combustibles sin densificar de 4 gasificadores. (Conducto del aire secundario 1, Gasificadores 2, Parrilla para el combustible 3.)

2.2.- Caracterización de los combustibles sólidos 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.

2.2.1.- 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 (Fig. 2.18), preferiblemente horizontal y en diferentes direcciones. Si la parrilla es la representada en la Fig. 2.19 (multitubularidad en la pila de leña).

Cuando la parrilla utilizada dispone de los gasificadores (Fig. 2.19), 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.

2.2.2.- Las briquetas combustibles.

Las briquetas macizas de biomásas 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 biomásas que conforman las briquetas precedentes, pueden ser disímiles, aunque se distinguen dos grupos principales.

- a) Briquetas de biomásas leñosas (aserrín de madera)
- b) Briquetas de biomásas no leñosas (hojas de árboles, cáscara de arroz, paja de cereales etc.).

Experimentos realizados (Fundora I. 2009 Tesis Maestría). Posibilitan realizar una simulación experimental y organizar los datos en una matriz factorial 2^3 de los factores independientes: relación equivalentes de diámetros de los conductos de la briqueta multitubular, al diámetro exterior de la briqueta ($d/D_{eq.}$), Tipo de biomasa, por la densidad natural (ρ_0) y densidad final de las briquetas (ρ_f), con el objetivo esencial de comprobar la influencia de la densidad en el aporte energético de las briquetas de las biomásas utilizadas, para tener un punto de referencia, cuando los combustibles utilizados en la estufa fueran biomásas residuales sin densificar (Densidades naturales).

Tabla 2.1. Matriz factorial, diseño factorial 2^3 .

No.	d/D eq	Pf kg/m ³)	po (kg/m ³)	Qb kj/kg
1	-1	-1	-1	4094
2	1	-1	-1	4466
3	-1	1	-1	4114
4	1	1	-1	4509
5	-1	-1	1	3961
6	1	-1	1	4174
7	-1	1	1	3993
8	1	1	1	4187

nivel	d/D _{eq}	po (kg/m ³)	pf (kg/m ³)
-1	0,3	No leñosa 25	500
1	0,5	Leñosa 120	1000

Resultados: $Q_b = 4187,25 + 146,75 \cdot d/D_{eq} - 108,5 \cdot \rho_0$ (2.1)

$R^2 = 94\%$; $E = 60$

Como puede apreciarse la densidad de las briquetas no influye en el modelo del aporte específico de energía (Q_b), y por consiguiente fue conveniente no considerarlo en el mismo, sin embargo es de gran significación la influencia de la relación geométrica (d/D_{eq}), esencialmente por el número de conductos más que por la magnitud de sus diámetros (d), en el caso estudiado, el número de conductos fue el mismo ($Z=5$) para ambos niveles de la relación precedente y el comportamiento del diámetro del conducto mayor ($d = 25$ mm), resultó el de mejor comportamiento respecto al de menor diámetro ($d = 15$ mm) como se puede observar fue determinante el valor de la relación geométrica equivalente (d/D_{eq}). Las biomásas no leñosas (pajas de cereales hojas de árboles etc.) tienen el mayor aporte energético. Esto está determinado por su constitución físico-química y su mayor facilidad al proceso de transformación termo-química (gasificación) que las biomásas leñosas.

2.2.3. Biomásas 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 biomásas 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 revisada⁶ plantean como dificultad para la transformación (gasificación) de las briquetas tubulares, su baja densidad, dado a la posibilidad de combustión en el conducto de las mismas, por la presencia de oxígeno en las oquedades de la superficie interior del conducto y a la infiltración de aire entre los espacios de la masa de biomasa que la forman, por su baja densidad. La solución de esta dificultad convierte a la tecnología de combustión en multipropósito, posibilitando el

aprovechamiento de las biomásas disponibles independientemente de su estado. Precisamente la investigación que se desarrolla en este trabajo centra su atención fundamental en esta alternativa, sin despreciar las restantes.

2.3.- Metodología para la evaluación de la estufa.

2.3.1.- Introducción.

En la evaluación de la estufa se consideraron diferentes alternativas de formación de la misma, combinadas con diferentes combustibles (biomásas) por características propias (tipos de biomásas) y por sus estados (sin densificar y densificados). Se utilizaron en cada prueba 2,5kg de combustible (biomásas) y se midió la temperatura (con termómetro láser) en diferentes locaciones (hornillas, superficie exterior del cuerpo de la estufa, alimentación del aire primario) gases a la salida de la chimenea, ambiente alrededor de la estufa (0,5m); Se emplearon 8 kg de agua para la determinación de la eficiencia del sistema térmico en todas las alternativas. Se cuantificó el tiempo de autonomía de la combustión (hasta que el aporte energético dejaba de ser significativo, para mantener ebullición del agua) se utilizó la resistencia eléctrica como fuente conocida para la determinar la energía específica ($Kw \cdot h/m^2$) y con ello se determinó la energía y la potencia disponible sobre la hornilla principal en cualquiera de las variantes. (Por analogía).

Para la investigación se estableció un código que determina la alternativa en cuestión, y garantiza organizar en una matriz todos los resultados de la evaluación para cada tipo de experimento.

⁶ Murayama T. Mizoguchi C. "Biqueting and combustion characteristics of coal-wood composite fuel" Bio-coal pp 551-558. 1981

2.3.2.- Definición de los códigos

En la definición de los códigos se utilizaron diferentes letras para cada **variable de operación**.

A- Parrilla de mono tubular con conducto de aire secundario de 50mm de diámetro.

B- Parrilla mono tubular con conducto de aire secundario de 100mm de diámetro.

- C-** Parrilla con un gasificador de 130mm de diámetro y conducto de aire secundario de 50mm.
- D-** Parrilla con 3 gasificadores de 60mm de diámetro y conducto de aire secundario de 150mm de diámetro.
- E-** Parrilla con 3 gasificadores de 60mm de diámetros y conducto de aire secundario de 100mm de diámetro.
- F-** Parrilla con 4 gasificadores de 40mm de diámetro y conducto de aire secundario de 50mm de diámetro.
- G-** Parrilla con 4 gasificadores de 40mm de diámetro y conducto de aire secundario de 100mm de diámetro.
- H-** Hornilla recuperativa eficiente.
- I-** Hornilla plana.
- J-** Leña como combustible.
- K-** Briquetas tubulares y multitubulares de biomásas $\rho = (400 - 1200) \text{ kg/m}^3$.
- L-** Biomásas leñosas sin densificar $\rho_0 = (65 - 150) \text{ kg/m}^3$ (aserrín fino de madera).
- M-** Biomásas no leñosas sin densificar $\rho_0 = (25 - 40) \text{ kg/m}^3$ (hojas de árboles, hierba seca, pajas de cereales etc.).
- N-** Flujo total de aire de alimentación, correspondiente a una velocidad de 0,5m/s.
- O-** Flujo total de aire de alimentación estrangulado, al 50% o más.

Códigos para las diferentes alternativas experimentales.

En los experimentos realizados se comprobó que la combustión era independiente del tipo de hornilla utilizada y la eficiencia en la hornilla plana resultó ser hasta un 50% inferior que en la hornilla recuperativa, a modo de reducir el número de experimentos en un 50%, se decidió utilizar sólo la hornilla recuperativa (H).

1.- **AHJN.** Parrilla mono tubular con conducto de aire secundario de 50mm de diámetro, leña como combustible y con el flujo total de aire de alimentación.

- 2.- **AHJO**. Parrilla mono tubular con conducto de aire secundario de 50mm de diámetro, leña como combustible, flujo de aire de alimentación estrangulado al 50%.
- 3.- **BHJN**. Parrilla mono tubular con conducto de aire secundario de 100mm de diámetro, leña como combustible, flujo total de aire de alimentación.
- 4.- **BHJO**. Parrilla mono tubular con conducto de aire secundario de 100mm de diámetro, leña como combustible, flujo de aire de alimentación estrangulado al 50%.
- 5.- **CHJN**. Parrilla con un gasificador de 130mm de diámetro y conducto de aire secundario de 50mm de diámetro con leña como combustible y todo el flujo de aire de alimentación.
- 6.- **CHJO**. Parrilla mono tubular de conducto de aire secundario de 50mm de diámetro, leña como combustible. Flujo de alimentación de aire estrangulado al 50%.
- 7.- **DHJN**. Parrilla de 3 gasificadores de 60mm de diámetro y conducto de aire secundario de 50mm de diámetro, con leña como combustible y flujo total de aire de alimentación.
- 8.- **DHJO**. Parrilla de 3 gasificadores de 60mm de diámetro con conducto de aire de alimentación de aire secundario de 50mm, flujo de aire de alimentación estrangulado al 50%.
- 9.- **EHJN**. Parrilla con 3 gasificadores de 60mm conducto de aire secundario de 100mm. Con leña como combustible y flujo total de alimentación de aire.
- 10.- **EHJO**. Parrilla con 3 gasificadores de 60mm conducto de aire secundario de 100mm. Con leña como combustible y flujo de aire de alimentación estrangulado al 50%.
- 11.- **FHJN**. Parrilla con 4 gasificadores de 40mm de diámetro y conducto de 50mm de diámetro para el aire secundario, con leña como combustible y flujo total de aire de alimentación.

12.- **FHJO**. Parrilla con 4 gasificadores de 40mm de diámetro y conducto de 50mm de diámetro para el aire secundario, con leña como combustible y flujo estrangulado de aire de alimentación al 50%.

13.- **GHJN**. Parrilla con 4 gasificadores de 40mm de diámetro, conducto de aire secundario de 100mm, leña como combustible, Flujo total del aire de alimentación.

14.- **GHJO**. Parrilla con 4 gasificadores de 40mm de diámetro, conducto de aire secundario de 100mm de diámetro, leña como combustible, aire de alimentación estrangulado al 50%.

15.- **AHKN**. Parrilla mono tubular con conducto de 50mm de diámetro para el aire secundario briquetas tubulares y multitubulares como combustible y flujo total de aire de alimentación

16.- **AHKO**. Parrilla mono tubular con conducto de aire secundario de 50mm, briquetas tubulares y multitubulares como combustible, flujo de alimentación de aire estrangulado al 50%.

17.- **BHKN**. Parrilla mono tubular con conducto de aire secundario de 100mm de diámetro, briquetas tubulares y multitubulares como combustible, flujo total de aire de alimentación.

18.- **BHKO**. Parrilla mono tubular con conducto de aire secundario de 100mm, briquetas tubulares y multitubulares y flujo de alimentación de aire estrangulado al 50%.

19.- **CHLN**. Parrilla con un gasificador de 130mm de diámetro, conducto de aire secundario de 50 mm de diámetro, biomasa leñosas sin densificar como combustible y flujo total de aire de alimentación.

20.- **CHLO**. Parrilla con un gasificador de 130mm de diámetro, conducto de aire secundario de 50 mm de diámetro, biomasa leñosas sin densificar como combustible y flujo de aire de alimentación estrangulado en un 50%.

21.- **CHMN**. Parrilla con un gasificador de 130mm de diámetro, conducto de alimentación de aire secundario de 50 mm de diámetro, biomasa no leñosas sin densificar como combustible y flujo total de aire de alimentación.

22.- **CHMO**. Parrilla con un gasificador de 130mm de diámetro, conducto de alimentación de aire secundario de 50mm de diámetro, biomasa no leñosa sin densificar como combustible y flujo de aire de alimentación estrangulado en un 50%.

23.- **DHLN**. Parrilla con 3 gasificadores de 60mm de diámetro, conducto de alimentación de aire secundario de 50mm de diámetro, biomasa leñosa sin densificar como combustible y flujo total de aire de alimentación.

24.- **DHLO**. Parrilla con 3 gasificadores de 60mm de diámetro, conducto de alimentación de aire secundario de 50mm de diámetro, biomasa leñosa sin densificar como combustible y flujo de aire de alimentación estrangulado en un 50%.

25.- **EHLN**. Parrilla con 3 gasificadores de 60mm de diámetro, conducto de alimentación de aire de 100mm de diámetro, biomasa leñosa sin densificar como combustible y flujo total de aire de alimentación.

26.- **EHLO**. Parrilla con 3 gasificadores de 60mm de diámetro, conducto de alimentación de aire secundario de 100mm de diámetro, biomasa leñosa sin densificar como combustible y flujo de aire de alimentación estrangulado un 50%

27.- **DHMN**. Parrilla con 3 gasificadores de 60mm de diámetro, conducto de aire secundario de 50 mm de diámetro, biomasa no leñosa sin densificar como combustible y flujo total de aire de alimentación.

28.- **DHMO**. Parrilla con 3 gasificadores de 60mm de diámetro, con conducto de aire secundario de 50mm de diámetro, biomasa no leñosa sin densificar como combustible y flujo de aire de alimentación estrangulado en un 50%.

29.- **EHMN**. Parrilla con 3 gasificadores de 60 mm de diámetro, con conducto de aire secundario de 100mm de diámetro, biomasa no leñosa sin densificar como combustible y flujo total de aire de alimentación.

30.- **EHMO**. Parrilla con 3 gasificadores de 60mm de diámetro, conducto de aire secundario de 100mm de diámetro, biomasa no leñosa sin densificar como combustible y flujo de alimentación de aire estrangulado un 50%.

31.- **FHLN**. Parrilla con 4 gasificadores de 40mm de diámetro, conducto de aire secundario de 50mm de diámetro, biomosas leñosas sin densificar como combustible y flujo total de aire de alimentación.

32.- **FHLO**. Parrilla con 4 gasificadores de 40mm de diámetro, conducto de aire secundario de 50mm de diámetro, biomosas leñosas sin densificar como combustible y flujo de de alimentación de aire estrangulado un 50%.

33.- **GHLN**. Parrilla con 4 gasificadores de 40mm de diámetro, conducto de aire secundario de 100mm de diámetro, biomosas leñosas sin densificar como combustible y flujo total de aire de alimentación.

34.- **GHLO**. Parrilla con 4 gasificadores de 40mm de diámetro, conducto de aire secundario de 100mm de diámetro, biomosas leñosas sin densificar como combustible y flujo de alimentación de aire estrangulado un 50%.

35.- **FHMN**. Parrilla con 4 gasificadores de 40mm de diámetro, conducto de aire secundario de 50mm de diámetro, biomosas no leñosas sin densificar como combustible y flujo total de aire de alimentación.

36.- **FHMO**. Parrilla con 4 gasificadores de 40mm de diámetro, conducto de aire secundario de 50mm de diámetro, biomosas no leñosas sin densificar como combustible y flujo de alimentación de aire estrangulado un 50%.

37.- **GHMN**. Parrilla con 4 gasificadores de 40mm de diámetro, conducto de aire secundario de 100mm de diámetro, biomosas no leñosas sin densificar como combustible y flujo total de aire de alimentación.

38.- **GHMO**. Parrilla con 4 gasificadores de 40mm de diámetro, conducto de aire de alimentación de 100mm de diámetro, biomosas no leñosas sin densificar como combustible y flujo de alimentación de aire estrangulado un 50%.

2.4.- ESTUDIO PRELIMINAR DE ALGUNAS ALTERNATIVAS DE FORMACIÓN DE LA ESTUFA, PARA LA COMBUSTIÓN DE BIOMASAS EN SUS DIFERENTES ESTADOS.

2.4.1. Introducción.

La formación de la estufa para la combustión en las diferentes alternativas de experimento mantendrá la forma básica (sin incluir la hornilla complementaria) (Fig. 2.13) y variará en las características de la parrilla, la que dispondrá de varias combinaciones posibles, para 5 tipos de combustibles principales (Leña, briquetas tubulares y multitubulares de biomasa, biomasa leñosa sin densificar y biomasa no leñosa sin densificar). Con dos tipos de hornillas principales (hornilla recuperativa y hornilla plana) y sin hornilla (cámara semiabierta). Como es de esperar se analizaron todas las alternativas de forma preliminar, para su comparación y elección de las variantes de mejores comportamientos en los índices de combustión (Temperatura media en la hornilla, energía media disponible en la hornilla, potencia media disponible en la hornilla y eficiencia del sistema térmico)

2.4.2. Parrilla mono tubular (Fig. 2.18) con hornilla recuperativa (Fig. 2.16).

a) Se utiliza un conducto central para el aire secundario de 50mm de diámetro y una cámara de combustión de 365mm de diámetro interior, para el combustible que hacen un volumen efectivo disponible para este último, de $22,6 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$, que en dependencia de la densidad de los combustibles utilizados (Leña o briquetas de cualquier característica) será la masa de los mismos, que se podrá cargar en el inicio del proceso de combustión.

- 1) Briquetas tubulares y multitubulares de biomasa leñosa o no leñosa, (Una masa de 2,5 kg).
- 2) Leña como combustible, (Una masa de 2,5kg).

En ambos casos (Leña o briquetas de biomasa), la combustión resultó ser completa, sin embargo en el caso (2), la leña tuvo la necesidad de funcionar con todo el comburente (aire primario) que le imponía el tiro de la chimenea de 65mm de diámetro interior y una altura mayor de 2m, totalmente abierta, además de aire secundario adicional por la ventana lateral de alimentación del combustible (el aire secundario del conducto central de la parrilla, no fue suficiente para la combustión de los gases combustibles generados en el proceso de gasificación). La temperatura media de la

hornilla resultó superior a los 500⁰C y la autonomía de la combustión fue superior a 2 horas, en estas condiciones de trabajo.

La combustión de las briquetas tubulares y multitubulares alcanzó niveles de temperatura media con similares características a la leña pero con una autonomía de la combustión, superior a 3 horas, dado a la posibilidad de este combustible a la regulación del aire primario y secundario, según la demanda de potencia en la aplicación.

La colocación de la hornilla principal plana no influyó en la combustión de los combustibles utilizados, si en el incremento de las pérdidas de calor en los gases de escape de (100 -130)⁰C, cuando se empleó la hornilla principal recuperativa y a más de 200⁰C con la hornilla plana, lo que se traduce en una pérdida de la eficiencia del sistema térmico entre el (25 y 50) % en relación con el caso precedente.

Como se puede apreciar las características de esta parrilla mono tubular son apropiadas para los combustibles densificados (Leña, Briquetas etc.), no puede ser empleada en combustibles sin densificar (a granel).

b) Se utiliza un conducto central para el aire secundario de 100 mm de diámetro y una cámara de combustión de 365 mm de diámetro interior, con las mismas condiciones que el caso precedente, esto resultó favorable para la combustión de la leña, sin necesidad de requerir aire secundario adicional, además permitió la regulación del aire de alimentación en más del 50%, ello posibilitó el aseguramiento de un mejor funcionamiento de la estufa y un sensible incremento de la autonomía. El aire de alimentación a la estufa, por su parte inferior aseguró la distribución conveniente del aire para el proceso de gasificación de la leña y el suficiente aire secundario por el conducto central, para la combustión de los gases combustibles en la parte superior de la cámara de combustión. El efecto de estas alternativas, en la combustión de las briquetas tubulares y multitubulares no fue significativo dado a la baja sensibilidad de éstas al cambio de los diámetros de los conductos de aire secundario (Funcionan bien en cualquiera de las alternativas, con posibilidad de una amplia gama de regulaciones del aire de alimentación, sin afectar la calidad del proceso de gasificación y de combustión).

No obstante demostró su factibilidad para el uso de uno u otro tipo de combustible lo que indica que para las dimensiones de la cámara de combustión utilizada y en correspondencia con la masa de combustible suministrada. El conducto o los conductos de aire secundario que se utilicen deben asegurar una sección transversal igual o superior a 10^{-2} m^2 , que están en una relación respecto al área total de la cámara de combustión del 27% o superior a este valor y colocados de forma conveniente (En contacto directo con la combustión), para la garantía del calentamiento del aire suministrado a la parte superior del combustible (aire secundario).

Cuando la estufa se hace funcionar sin hornillas como una chimenea directa al fuego, puede funcionar adecuadamente con independencia de la característica de la parrilla y del combustible utilizado (incluye las alternativas que no se han analizado hasta aquí).

Esta alternativa es útil para dimensiones de la olla superior a 300 mm de diámetro y cuando se requiere mayor potencia térmica y energía que la obtenida con la hornilla plana, preferiblemente sin chimenea y con la olla introducida dentro de la cámara de combustión de la estufa, no menos de 100 mm; Si la holgura entre esta última y la olla es de (15 - 20) mm, se logran los más elevados índices de eficiencia del sistema térmico. Cuando la olla es mayor que el diámetro de la estufa puede situarse obstruyendo la cámara de combustión (con chimenea) y se comporta como una hornilla plana, o colocarse entre (20 - 40) mm por encima de la parte superior de la cámara de combustión (Fuera de ésta), todas las alternativas de parrillas pueden ser utilizadas, sin embargo en la alternativa precedente el aire secundario del conducto en cuestión puede asegurar la combustión dentro y fuera de la cámara de combustión, las llamas que salen de la cámara de combustión están determinadas fundamentalmente por la combustión del combustible gaseoso con el oxígeno aportado por el aire terciario y ello redundará en mejor aprovechamiento de este último.

Esta alternativa tiene su antecedente en la literatura revisada y en trabajos de investigación de la universidad de Cienfuegos, (Irving. F Tesis de maestría 2009) sobre todo con leña y briquetas. En el siguiente trabajo se usa, además de los combustibles antes mencionados, las biomásas leñosas y no leñosas sin densificar, con dispositivos para la gasificación.

2.4.3.- Parrilla mono tubular con conducto de aire secundario de 50 mm de diámetro y un gasificador central de 130 mm de diámetro ($d/D_{eq} = 0,356$), con el 17% del aire de alimentación como aire secundario.

La temperatura en la hornilla recuperativa no superó los 250⁰C, con una potencia térmica (inferior a 1,3 kw) y elevada pérdida de gases combustibles, así como muy baja eficiencia del sistema térmico. Las restantes alternativas (hornilla plana y sin hornilla, cámara de combustión semi abierta) no fueron analizadas, sin embargo si se estrangula el flujo de aire de alimentación y se suministra aire secundario por la ventana de alimentación del combustible puede funcionar la alternativa en cuestión, pero los índices anteriores no mejoran significativamente.

2.4.4.- Parrilla con 4 gasificadores de 40mm de diámetro.

a) Conducto central para el aire secundario de 50mm de diámetro (23% de aire de alimentación para el aire secundario).

En esta alternativa se utilizó biomasa leñosa y no leñosa sin densificar (aserrín de madera, hojas de árboles, hierba seca, hojas de caña etc.) se logró una combustión eficiente desde el punto de vista de la combustión del combustible, con valores medios de temperatura en la hornilla recuperativa y en la plana superior a 550⁰C y una autonomía en la combustión de 2,5 horas, para una masa de 2,5 kg de biomasa.

Los gases generados en el proceso de gasificación necesitaron que todo el aire secundario del conducto de la parrilla, participara en la combustión de las mismas, no fue posible la estrangulación del aire de alimentación, por el contrario se necesitó de un suministro adicional por la ventana de alimentación del combustible, para la combustión completa de los gases combustibles generados en el proceso de gasificación. En este caso menos de la tercera parte del aire de alimentación se utiliza como aire en la combustión secundaria y ello satisface parcialmente la combustión de los gases combustibles generados en el proceso de gasificación, lo cual indica que una combustión será completa si se supera el 30% de alimentación de aire secundario a la combustión de los gases combustibles sobre la cámara de combustión. Cualquier disminución de la alimentación del aire (Caso precedente), reduce la proporción en el

aire secundario al igual que el aire a los gasificadores, pero ello, favorece a la gasificación, por lo que habrá una proporción de gases combustible superior para una insuficiente cantidad de aire secundario que aporta insuficiente oxígeno para la combustión de los mismos. (Combustión incompleta).

b). Conducto de 100mm de diámetro interior como conducto de aire secundario (61% del aire de alimentación como aire secundario).

El proceso de combustión puede ser regulado a la potencia requerida en la aplicación (Se puede indistintamente estrangular, la alimentación de aire o no). La relación del diámetro del conducto de aire secundario al diámetro de la cámara de combustión se incrementa en el doble de (0,13 a 0,27) y el área efectiva de la sección transversal de la briqueta combustible, de 0,099 m² pasa a 0,092 m² que representa el 93% de la primera, para una reducción efectiva del 7%.

La relación de diámetros equivalente de las briquetas, cuando se deja de considerar el conducto de alimentación de aire secundario es de $d/D_{eq(1)} = 0,225$ y $d/D_{eq(2)} = 0,234$ respectivamente, lo que demuestra que no existe diferencia significativa en las características geométricas de éstas, cuando participan en la combustión. Sin embargo en el caso de $d/D_{eq(2)} = 0,234$ (Conducto de aire secundario de diámetro interior de 100mm) el comportamiento resulta superior, lo que demuestra la importancia del incremento de la alimentación del aire secundario y la posibilidad de regulación de la combustión.

2.4.5.- Parrilla de 3 gasificadores de 60mm de diámetro ($d/D_{eq} = 0,288$).

a) **Conducto de aire secundario de 50 mm** y hornilla principal recuperativa con una masa de 2,5 kg de biomasa sin densificar, 18% del aire de alimentación como aire secundario, ocurre algo similar al caso de la alternativa de un gasificador de 130mm, que con el 100% de la alimentación de aire a la estufa, no se produjo la gasificación y cuando el flujo se estranguló a menos de 50%, se produjo una pobre gasificación que necesitó la alimentación adicional de aire secundario para la combustión de los gases combustibles, en la parte superior de la cámara de combustión. Este comportamiento se explica por el exceso de oxígeno en los gasificadores, suficiente para la combustión en

el interior del conducto, lo que reduce al mínimo la producción del CO (monóxido de carbono) y de otros gases combustibles y a la baja temperatura en el conducto (Por el volumen de aire en el gasificador), con valores inferiores a 900°C . Cuando se realiza la estrangulación del aire de alimentación ocurre lo contrario. La combustión o reacción termoquímica, tiene lugar a la entrada del gasificador, formando CO_2 , el cual se reduce al desplazarse dentro del mismo, formando los gases combustibles (La gasificación ocurre con déficit de oxígeno).

La producción de gases combustible es tal que el aire secundario del conducto resulta insuficiente para la combustión, ello se demuestra al abrir la ventana lateral de alimentación, con las llamas que salen de la misma. En estas circunstancias, se produce aporte energético a las hornillas y la temperatura en éstas puede alcanzar los 400°C .

b) Conducto de aire secundario de 100 mm de diámetros interior y hornilla principal recuperativa con una masa de combustible (biomasas sin densificar) de 2,5kg ($d/D_{\text{eq}}=0,31$) y con el 48% del flujo total de aire de alimentación como aire secundario, aseguran la gasificación para cualquier régimen de trabajo de la estufa y la generación de energía térmica requerida en la aplicación, desde valores elevados que aseguran en la hornilla temperaturas superiores a los 500°C (Con el 100% de flujo de aire de alimentación), a valores inferiores, que producen en la hornilla temperaturas entre (370 y 480) $^{\circ}\text{C}$, según la magnitud de la estrangulación del flujo de aire de alimentación y la regulación del tiro de la chimenea.

La alternativa de regulación anterior posibilita incrementar la autonomía del funcionamiento de la estufa en más del 50%.

El flujo medio de aire que mueve la chimenea cuando no existe estrangulación en la alimentación del aire (100% del flujo de aire de alimentación) es de $3,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$, para una velocidad media del aire de alimentación de 0,5 m/s (medida con un anemómetro de precisión 0,01m/s).

2.4.6.- Parrilla con gasificadores, con la leña y briquetas tubulares y multitubulares como combustibles.

La utilización de las parrillas con gasificadores destinadas a las biomásas sin densificar con la leña o las briquetas de biomásas como combustibles aseguran el aire secundario suficiente para la combustión de los gases combustibles generados en el proceso de gasificación (Cada gasificador se convierte en un conducto de aire secundario adicional) y la relación de aire secundario con respecto al aire de alimentación, en todos los casos supera el 30%, suficiente para la combustión de los gases, con independencia de la regulación del aire de alimentación, con temperatura en la hornilla, superior a los 450⁰C y con elevados valores de los índices de combustión. Esta respuesta confirma la universalidad de las parrillas con los gasificadores, sobre todo si la relación entre el área del conducto de alimentación de aire secundario y el área total (Considerando el área del conducto de aire secundario y la de todos los gasificadores de la parrilla) resulta superior al 30%, ello posibilita una efectiva gasificación de cualquier combustible sólido (biomásas) y una combustión eficiente de los gases combustibles producidos en el proceso, sin necesidad de suministro adicional de aire secundario y con un aporte energético elevado, en correspondencia con la regulación de la combustión deseada.

2.5.- Determinación de la eficiencia del sistemas térmico (η_{sc}).

a) Hornilla recuperativa 2,5kg de biomásas no leñosa sin densificar, con 12% de humedad, parrilla con 4 gasificadores de 40mm de diámetro y conducto de aire secundario de 100 mm para un 61% del total del aire de alimentación, como aire secundario y una relación $d/D_{eq}= 0,234$ para la briqueta multitubular formada.

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

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

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

η_{sc} - Eficiencia del sistema térmico (%).

En la simulación del experimental mostrada en la tabla (2.1), se muestra, que en las briquetas multitubulares, de biomásas no leñosas de baja densidad, con relación de diámetros equivalente ($d/D_{eq}= 0,3$), se obtiene un aporte energético específico ($Q_{cb}= 4094$ kJ/kg)

$$Q_a = C_{pa} \cdot (T_f - T_o) + (1 - m_{fa}/m_{0a}) \cdot \zeta \quad 2.2$$

Donde:

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

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

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

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

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

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

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

$m_{0a} = 8 \text{ kg}$

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

$m_{fa} = 1 \text{ kg}$

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

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

$Q_a = 2276,54 \text{ kJ/kg}$.

$\eta_{sc} = 55,6\%$.

Condiciones del experimento:

- a) Se suministró el agua directamente en el receptáculo de la hornilla equivalente a tener una olla directamente al fuego introducida en el interior de la cámara de combustión y con un mínimo de holgura entre ésta y la olla, recibiendo calor por el fondo y por toda la superficie lateral vinculada con el nivel del agua.
- b) Hornilla plana de 12 mm de espesor con una olla de dimensiones iguales al receptáculo de la hornilla, en contacto directo con ésta, por el fondo. Las restantes condiciones del experimento son similares al anterior.

Masa inicial del agua; $m_{0a} = 8 \text{ kg}$.

Masa final del agua; $m_{fa} = 3,7$ kg

$\eta_{sc} = 37$ %.

La hornilla plana introduce alrededor de un 30 % de pérdida de eficiencia en el sistema térmico respecto a la hornilla recuperativa y por consiguiente un adicional incremento del consumo de combustible sólido, para la misma aplicación.

2.6.- Determinación de la energía media específica disponible (Q_e), sobre la hornilla eléctrica del hogar (Como patrón de referencia)

Se utilizó como fuente térmica conocida, la hornilla eléctrica de "La Revolución Energética" con resistencia variable según la demanda de potencia de la aplicación, con dispositivo ahorrador de cerámica, que concentra el calor en un área de $0,0214$ m², independientemente de la regulación de la resistencia y considerando la energía en una hora de operación, se obtiene: a) Para $1,2$ kW de potencia térmica, $56,4$ (kW-h)/m² de energía específica disponible en la hornilla eléctrica, para una temperatura superior a 470 °C (Medida con un termómetro láser de una precisión de 1 °C), $37,4$ (kW - h)/m², para una potencia térmica de $0,8$ kW y una temperatura en la hornilla de $(410 - 469)$ °C y $22,5$ (kW-h)/m², con la potencia térmica de $0,4$ kW y temperaturas hasta 409 °C.

2.7.- Determinación de la energía media y la potencia media disponibles en la hornilla recuperativa.

Según la magnitud de la temperatura media en la hornilla recuperativa de $0,132$ m² de superficie útil (Medida con un termómetro laser de 1 °C de precisión), considerando el tiempo de autonomía de la combustión de $2,5$ kg del combustible sólido utilizado, se determinó la energía media disponible en la hornilla, así como la potencia media disponible, utilizando el principio de la analogía de los sistemas de combustión, cuando el contacto de la olla con la superficie caliente de la hornilla es directo. Considerando el combustible del epígrafe 2.6, se plantean a continuación las expresiones para la determinación de la energía y la potencia media disponible en la hornilla recuperativa.

$$E_{dip} = Q_e \cdot A_h \text{ (kW-h)} \quad (2.3)$$

$$N_{dip} = E_{dip} / t_{ef} \text{ (kW)} \quad (2.4)$$

Donde: E_{dip} - Energía media disponible en hornilla recuperativa. (Kw - h)

Q_e - Energía térmica específica equivalente. (Kw - h/m²)

A_h - Área útil de la hornilla recuperativa. (m²)

N_{dip} - Potencia media disponible en la hornilla recuperativa. (Kw)

T_{ef} - Tiempo de autonomía de la estufa con 2,5 kg de combustible sólido. (h)

Para una temperatura de la hornilla recuperativa superior a 470 °C, un área útil de la misma de 0,132 m², un tiempo efectivo de la combustión de 2 horas, se obtiene una energía media disponible de 7,45 kW y una potencia media disponible de 3,72 Kw. En la tabla 2.2 (Ver Anexo No.2) se exponen los resultados de todas las alternativas de experimentos.

Si se consideran las parrillas con gasificadores de diámetros (130, 60, 40)mm en un número (1, 3, 4) respectivamente, con conductos de aire de alimentación de diámetro (50, 100) mm con flujo de aire de alimentación estrangulado y total (0,00175 ; 0,0035) m³/s y como combustible biomasa no leñosas sin densificar, se pueden organizar estos resultados en una matriz, tal como se muestra en la tabla 2.3.

N_0	d_g mm	n_g	Q_t m ³ /s	B %	T_H °C	E_{disp} kW-h	N_{disp} kW	η_{sc} %
1	130	1	0,0035	17	275	3,45	0,86	12
2	130	1	0,00175	17	385	3,47	0,81	22
3	60	3	0,0035	18	280	3,43	0,98	14
4	60	3	0,00175	18	410	6,45	2,15	31
5	60	3	0,0035	48	394	3,45	1,28	30
6	60	3	0,00175	48	480	6,45	1,90	48
7	40	4	0,0035	30	550	7,45	2,97	54

8	40	4	0,00175	30	530	7,45	2,12	49
9	40	4	0,0035	61	570	7,45	2,97	55
10	40	4	0,00175	61	520	7,45	2,48	52

Tabla 2.3. Valores de los factores independientes diámetro de los gasificadores (d_g), número de gasificadores (n_g), flujo de aire de alimentación (Q_T), Fracción del aire de alimentación como aire secundario (β) y los factores dependientes temperatura media en la hornilla (T_H), energía y potencia disponible en la hornilla recuperativa (E_{disp} , N_{disp}) respectivamente y eficiencia del sistema de combustión (η_{sc})

Realizando un análisis de regresión lineal múltiple se obtuvieron los siguientes resultados de los factores dependientes.

$$T_H = -891,26 + 1,56.\beta + 7,60.d_g + 283,85.n_g - 29257.Q_T \text{ (}^\circ\text{C)}; \quad R^2 = 83,60; \quad E = 58,3 \quad (2.4)$$

$$N_{disp} = 6,83 - 0,0034.\beta + 0,045.d_g + 1,91.n_g - 45,71.Q_T \text{ (kW)}; \quad R^2 = 78,20; \quad E = 0,52 \quad (2.5)$$

$$E_{disp} = -14,77 + 0,00032.\beta + 0,117.d_g - 692,57.Q_T + 4,84.n_g \text{ (kW - h)}; \quad (2.6)$$

$$R^2 = 83,86; \quad E = 1,04$$

$$\eta_{sc} = -130,27 + 0,30.\beta + 0,9.d_g - 4228,6.Q_T + 36.n_g; \text{ (%)}; \quad R^2 = 86,51; \quad E = 8,3 \quad (2.7)$$

2.8.- Análisis de los resultados de todas las alternativas de experimentos .

Todas las alternativas de parrillas aseguraron un funcionamiento para la leña como combustible, con índices de eficiencia en el sistema térmico superior al 40 % como promedio, energías medias disponible en la hornilla recuperativa entre (6,45 - 7,45) Kw - h, potencias térmicas medias disponible entre (1,75 – 3,72) Kw y temperaturas medias entre (425 – 580)⁰C, considerando aire de alimentación al 100% y estrangulado en un 50% o más.

Las briquetas tubulares y multitubulares de biomasa leñosas o no leñosas funcionan con eficiencias superiores al 45%, con temperaturas en la hornilla recuperativa superiores a los 450 °C y en los demás índices de combustión superan a la leña (En los experimentos con briquetas tubulares y multitubulares, no se utilizaron las parrillas con gasificadores), con independencia de la regulación del aire de alimentación.

Las biomasa sin densificar, requieren de las parrillas con los gasificadores para poder funcionar, ello asegura la formación de una gran briqueta tubular o multitubular que ocupa el área interior de la estufa, los peores comportamiento en los índices de combustión están relacionados con el diámetro de los gasificadores, con la magnitud del flujo de aire de alimentación y con la distribución de este flujo de aire, a los gasificadores y conducto de aire secundario respectivamente.

El peor comportamiento, corresponde la alternativa (CHLN y CHMN) con un gasificador de 130 mm de diámetro, conducto de aire secundario de 50 mm de diámetro y 100% del flujo de aire de alimentación, seguido por la alternativa (DHLN y DHMN), que corresponden a una parrilla con 3 gasificadores de 60 mm de diámetro, con un conducto de aire secundario de 50 mm de diámetro y 100% del flujo de alimentación.

Los mejores comportamientos en los índices de combustión coincidieron, con las alternativas que utilizaron parrillas con 4 gasificadores de 40 mm de diámetro, con independencia del diámetro del conducto de aire secundario y de la regulación del flujo de aire de alimentación, tal como ocurrió en las alternativas que utilizaron las briquetas tubulares y multitubulares. Sin embargo en las alternativas (FHLO y FHMO), fue necesario un aporte complementario de aire secundario para la combustión completa de los gases combustibles generados en el proceso de gasificación.

La relación (β) representa la fracción del aire de alimentación que participa como aire secundario en la combustión de los gases combustibles en la parte superior de la cámara de combustión, los que se mueven a través de un conducto, dispuesto en la parte central de la parrilla, un valor inferior al 30% (Biomasa sin densificar), no siempre es un indicador de la inefectividad del proceso de gasificación, puede ocurrir una gasificación productiva, sin embargo puede faltar el aire secundario necesario, la medida puede ser la combustión de los gases combustibles dentro y fuera de la estufa, cuando

se abre la ventana de alimentación lateral del combustible (FHLO y FHMO), si este fenómeno no se produce, es un indicador que no existe la gasificación (CHLN, CHMN, DHLN y DHMN). La estrangulación del aire de alimentación un 50% o más, puede ser el paliativo para las alternativas precedentes.

En el proceso de gasificación de la estufa evaluada influyen dos factores esenciales:

- a) Diámetro de los gasificadores.
- b) Magnitud del flujo de aire de alimentación.
- a) Diámetro de los gasificadores.

Gasificadores de diámetros igual o menor de 40 mm, distribuidos en la parrilla de forma conveniente aseguran un proceso de gasificación adecuado, con independencia del número de éstos y del aire secundario que se aporte a la combustión, la energía y la potencia térmica generados por el combustible, están en estrecha vinculación con estos factores.

b) Magnitud del flujo de aire de alimentación.

Gasificadores de diámetros superiores a los precedentes en un número tal que pueda afectar la fracción del aire de alimentación como aire secundario por debajo del 30%, y hacer peligrar el proceso de gasificación, a menos que se dispongan de medidas de regulación del flujo de alimentación de aire, al mínimo necesario (50% o más). El incremento del diámetro de los gasificadores, incrementa el flujo de aire a los mismos, provocando la combustión en diferentes partes del conducto, a la vez, baja la temperatura a niveles inferiores al necesario para el proceso de gasificación, estos dos factores se unen para impedir la gasificación del combustible.

Los resultados del diseño de experimento, mostrados en la tabla 2.3 y las diferentes correlaciones obtenidas en la regresión lineal múltiple de las variables independientes, con cada una de las variables dependientes analizadas, permite afirmar de forma definitiva, la influencia significativa del incremento del número de gasificadores, así como la disminución del flujo de aire de alimentación a la estufa (Recuérdese que la gasificación es productiva, cuando el oxígeno es deficitario), los demás factores influyen

de forma positiva pero con menor significación, por ejemplo el aire secundario (β) tiene poca influencia en la energía y la potencia disponible en la hornilla, sin embargo es importante su influencia en la temperatura de la hornilla y en la eficiencia del sistema de combustión, sin embargo el incremento del diámetro de los gasificadores que en sus inicios tuvo una respuesta negativa, cuando el flujo de alimentación de aire era del 100%, en los resultados expresados a través de las diferentes correlaciones precedentes, es positivo y debe ser tomado en cuenta, esta respuesta, tiene gran significación, porque permite utilizar cualquier número de gasificadores con cualquier diámetro, siempre que se asegure el oxígeno requerido para la efectividad del proceso de gasificación.

2.9.- Conclusiones parciales.

1. Las respuestas favorables de la combustión de diferentes combustibles sólidos, en la estufa evaluada, reafirma el criterio de la multitubularidad como una condición indispensable para la gasificación de los combustibles sólidos.
2. El suministro deficiente de aire de alimentación al combustible, constituye la otra condición esencial para el aseguramiento de la gasificación.
3. La presencia de la parrilla con el conducto de aire secundario en su parte central y los gasificadores alrededor de éste, incorporan nuevos elementos que aseguran el aprovechamiento racional y eficiente de cualquier manifestación de las biomásas, independiente de su grado de preparación para la combustión y de la tecnología de combustión de sólido en pila utilizada.
4. El uso de la hornilla recuperativa, garantiza el más elevado aprovechamiento de la energía de la combustión del combustible sólido utilizado, sin ensuciamiento de las ollas que se empleen en la cocción de alimentos, no obstante el aprovechamiento del calor de la olla será superior, si se constituye como parte de las superficies expuestas al calor directo de la combustión, como sucede con la hornilla recuperativa.

5. La incorporación de la hornilla plana complementaria a la salida de los gases quemados en la cámara de combustión y después de la hornilla recuperativa, permiten la recuperación del calor, sin afectar la calidad del proceso de combustión, para aplicaciones de manutención de la temperatura de los alimentos y calentamiento de agua a temperaturas inferiores a 100⁰C.

CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA DE DISEÑO DE GASIFICADORES DE BIOMASAS.

3.1- 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.

Para desarrollar la metodología de diseño de gasificadores de biomásas, empleando el principio de la Multitubularidad provocada, en la combustión e lecho fijo de capa gruesa, se procedió al diseño experimental de un prototipo de fogón utilizado para la cocción de alimentos, el cual se describe a continuación.

3.2- ÍNDICE DE TRANSFORMACIÓN DE LAS BIOMASA EN BIOGÁS, DURANTE EL PROCESO DE GASIFICACIÓN.

3.2.1 Gasificación de las biomásas en la combustión en lecho fijo de capa gruesa con Multitubularidad provocada.

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

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

El índice de transformación de las biomásas representa la relación entre la pérdida absoluta de masa de la briqueta (Diferencia de la masa inicial de la briqueta con la masa medida en la balanza, correspondiente al fin de la combustión con llamas), respecto a la masa inicial.

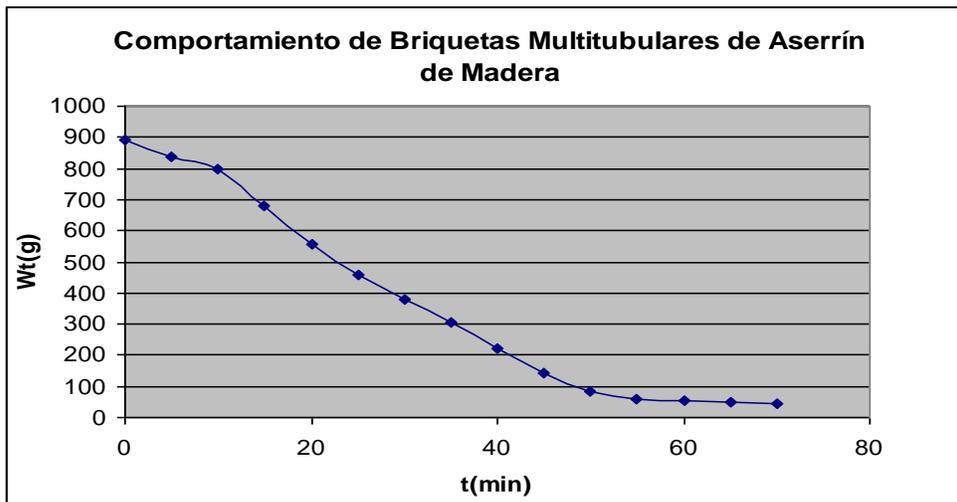
$$\psi = \frac{w_0 - w_f}{w_0} = \left(1 - \frac{w_f}{w_0} \right) \tag{3.1}$$

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 3.1 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. 3.1 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 3.1 puede ser representada por un modelo físico matemático de la forma siguiente: $w_t = b_0 + b_1 \cdot e^{-c_1 \cdot t}$

(3.2)

Donde:

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

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

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

$t \Rightarrow$ Tiempo, (min).

La constante c_1 se determina, linealizando la función matemática exponencial (3.2).

$$L_n \ln(w_t - b_0) = L_n \ln(b_1 - c_1 \cdot t) \quad (3.3)$$

Equivalente a la ecuación lineal.

$$y = A + B \cdot X \quad (3.4)$$

Donde:

$$A = L_n b_1$$

$$B = -c_1$$

Derivando la ecuación (3.2).

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

$$v_g = \frac{dw_t}{dt} = -b_1 \cdot c_1 \cdot e^{-c_1 \cdot t}, \text{ (g/min)} \quad (3.5)$$

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.

$$\Delta W = \int_{t_1}^{t_2} V_g \cdot dt \quad (3.6)$$

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

$T_2 \Rightarrow$ Se obtiene de la ecuación (3.4) y de los experimentos realizados por (Fundora I.) donde se considera que valores de $v_g \leq 3 \frac{\text{g}}{\text{min}}$, finaliza la combustión con llamas y el aporte energético del carbón libre de las briquetas no tiene importancia energética.

$$v_g = 3,5 \frac{\text{g}}{\text{min}}$$

$$3,5 = -b_1 \cdot c_1 \cdot e^{-c_1 \cdot t_2} \quad (3.7)$$

Linealizando la ecuación (3.6)

$$\text{Ln} \left(\frac{3,5}{b_1 \cdot c_1} \right) = -c_1 \cdot t_2$$

$$t_2 = - \frac{\text{Ln} \left(\frac{3,5}{b_1 \cdot c_1} \right)}{c_1}$$

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

$$\Delta w = b_1 \cdot e^{-c_1 \cdot t} / 5 \frac{\ln\left(\frac{3,5}{b_1 \cdot c_1}\right)}{c_1} \quad (3.8)$$

$$\psi = \frac{\Delta w}{w_0} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} v g \cdot dt}{w_0} \quad (3.9)$$

De la evaluación de la ecuación (3.3) 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 biomاسas.

En la tabla 3.1 se exponen los valores de c_1 para diferentes relaciones $\left(\frac{d}{D}^{eq}\right)$.

Biomاسas	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 de Madera	0,044	0,053	0,065	0,086	0,094	0,103	$\left(\frac{d}{D}^{eq}\right)$

Tabla 3.1. Característica de comportamiento de la curva, determinada por el tipo y estado de la biomasa, $\frac{d}{D}eq$ y de otros factores físicos inherentes a la misma.

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 3.2 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 (min ⁻¹)	t_2 (min)	Δw (g)	Δt (min)	ICP (g/min)	ψ
Paja de Caña	0,3	950	0,033	170	802	165	5	0,80
	0,5	950	0,068	82	673	77	8,7	0,67
Cáscara de Café	0,3	970	0,047	120	763	115	6,7	0,76
	0,5	970	0,073	77	670	72	9,3	0,67
Aserrín de 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

Tabla 3.2. Valores de ψ para briquetas de biomosas con $\frac{d}{D}eq$

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} - Área de Gasificación, (m²).

$A_{parrilla}$ - Área de la Parrilla, (m²).

$$A_{gasif} = \frac{V_{gasif}}{H}, \text{ (m}^2\text{)} \quad (3.10)$$

$V_{gasif} \Rightarrow$ Constituye el volumen de los espacios vacíos en la cámara de combustión, (m³).

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

Ecuación para leña y briquetas macizas.

$$V_{gasif_1} = V_{cámara} - V_{comb.} \quad (3.11)$$

Donde:

$V_{cámara} \Rightarrow$ Volumen potencial efectivo de la cámara de combustión, (m³).

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

Donde:

$V_{comb} \Rightarrow$ Volumen aparente del combustible sólido, (m³).

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

$\rho_{comb} \Rightarrow$ Densidad del combustible, (kg/m³).

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

$$A_{Gasf.Perimetral} = \sqrt{\frac{4 \cdot A_{gasif}}{\pi}} \cdot \pi \cdot H_{cámara}, (m^2) \quad (3.12)$$

Donde:

$A_{gasif} \Rightarrow$ Se obtiene de la ecuación (3.10).

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

$$V_{gasif_2} = V_{cámara} - V_{comb.} \pm V_{cond.}, (m^3) \quad (3.13)$$

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

$$V_{cond.} = \frac{d}{D} eq_{briq} \cdot V_{comb.}, (m^3) \quad (3.14)$$

Cuando las biomazas son sin densificar, se requiere provocar la multitubularidad, mediante el empleo de gasificadores distribuidos convenientemente en la sección transversal de la parrilla, lo que asegura la relación $(\frac{d}{D} eq)$. Sin embargo se ha demostrado experimentalmente (Capitulo 2) 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.

$$A_{gasif} = \pi \cdot D \cdot z \cdot H, (m^2) \quad (3.15)$$

Donde:

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

$z \Rightarrow$ Número de gasificadores.

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

En la figura 3.2 Se muestra el experimento realizado con cáscara de café y 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}).

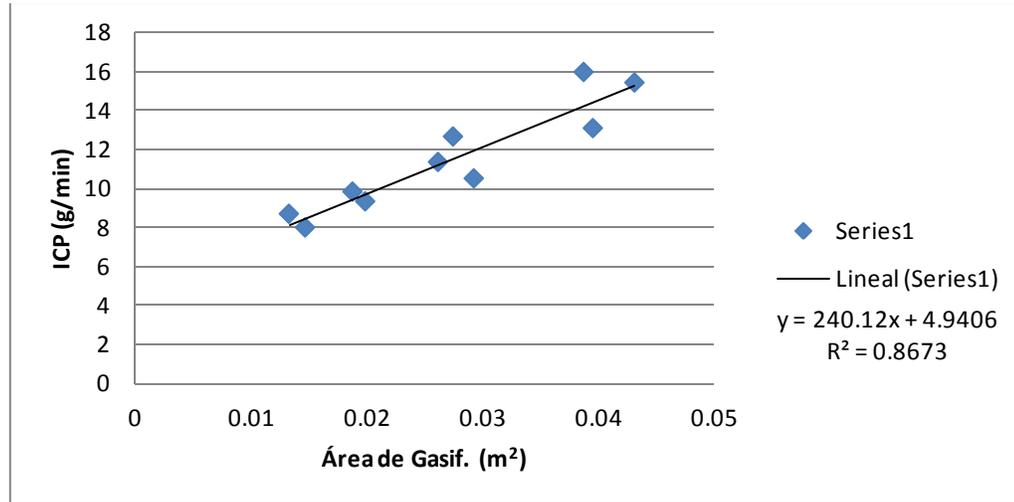
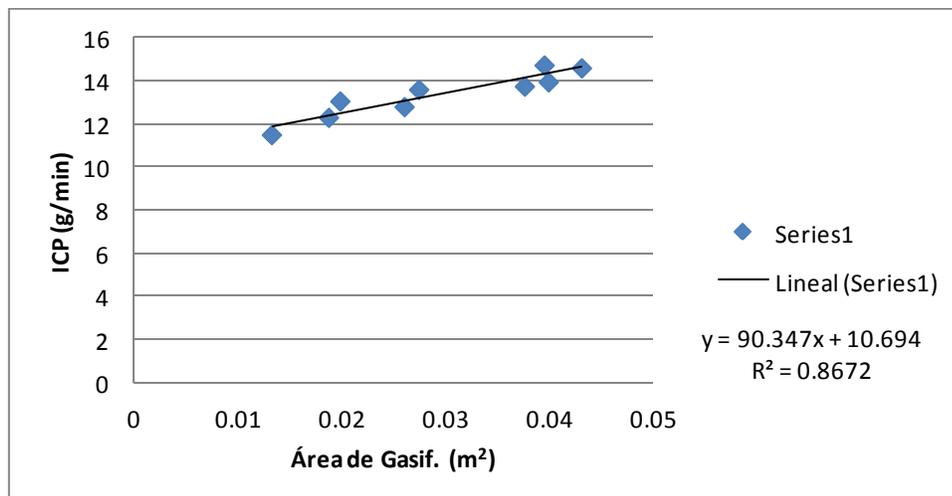


Figura 3.2 Muestra la característica de comportamiento entre el ICP y el Área perimetral de los gasificadores para aserrín de madera.

En la figura 3.3 Se muestra el experimento realizado con aserrín de madera, con briquetas multitubulares (Infante C. 2010) se denota una correspondencia lineal entre el índice de combustión promedio (ICP) y el área perimetral del gasificador (A_{Gasif}).



En la figura 3.3 Muestra la característica de comportamiento entre el ICP y el Área perimetral de los gasificadores para cáscara de café.

No obstante el índice de combustión promedio puede ser determinado utilizando el índice de transformación (ψ) de la ecuación (3.9) determinado para una masa unitaria según los experimentos y multiplicado por la masa total disponible en la cámara de combustión.

$$\Delta w = \psi \cdot w_{total} \quad , \text{ (g)} \quad (3.16)$$

$$ICP = \frac{\Delta w}{\Delta t} = \frac{\psi \cdot w_{total}}{\Delta t} \quad (3.17)$$

$$\Delta t = t_2 - t_1$$

$$\Delta t = - \frac{\text{Ln} \left(\frac{3,5}{b_1 \cdot c_1} \right)}{c_1} - 5 \quad , \text{ (min)}$$

Donde:

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

$$b_1 = \bar{w}_t - b_0$$

Determinación de la energía del proceso de gasificación.

$$E_{gasif} = V_g \cdot \psi \cdot w_{total} \quad , \text{ (kJ)} \quad (3.18)$$

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.

$$N_{gasif} = 0,06 \cdot V_g \cdot ICP \quad , \text{ (kJ/h)} \quad (3.19)$$

$$N_{gasif} = 1,66 \cdot 10^{-5} \cdot V_g \cdot ICP \quad , \text{ (kW)} \quad (3.20)$$

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).

$$ICP = 241 \cdot A_{gasif} + 4,92 \Rightarrow \text{Para biomosas leñosas (aserrín de madera o leña).}$$

$$ICP = 90,31 \cdot A_{gasif} + 10,69 \Rightarrow \text{Para biomosas no leñosas (Cáscara de café, bagazo de caña etc.)}$$

$$A_{gasif} = z_1 \cdot \pi \cdot d_{gasif} \cdot H_{gasif} \Rightarrow \text{Área } \mathbf{perimetral} \text{ del gasificador, (m}^2\text{).}$$

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 (3.19)

$$ICP_{nec} = \frac{16,66 \cdot N_{gasif}}{V_g} \quad , \text{ (g/min)}$$

Donde:

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

Despejando la ecuación (3.20)

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

Donde:

$$N_{gasif} \Rightarrow \text{En (Kw)}.$$

Para biomasas no leñosas (Cáscara de Café).

$$A_{gasif} = \frac{ICP - 10,69}{90,31} \text{ (m}^2\text{)}$$

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.

Como el área de gasificación.

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

$$\pi \cdot z_1 \cdot d \cdot H_{gasif} = \frac{ICP - 10,69}{90,31}$$

$$\pi \cdot \left(\frac{d}{D} eq \right)^2 \cdot D \cdot H_{gasif} = \frac{ICP - 10,69}{90,31}$$

$$H_{gasif} = \frac{ICP - 10,69}{90,31 \cdot \left[\pi \cdot \left(\frac{d}{D} eq \right)^2 \cdot D \right]} \text{ (m)}$$

Volviendo al área de gasificación inicial.

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

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 (3.18).

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

$$w_t = \rho_0 \cdot V_{ef} \quad (3.21)$$

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).

$$V_{ef} = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \left[1 - z_1 \left(\frac{d}{D} \right)^2 \right] \cdot H_{gasif} \quad (3.22)$$

Sustituyendo en la ecuación (3.18).

$$E_{gasif} = 0,785 \cdot V_g \cdot \psi \cdot H_{gasif} \cdot D^2 \left[1 - z_1 \left(\frac{d}{D} \right)^2 \right]$$

Donde:

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

$z_1 \Rightarrow$ Número de gasificadores.

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

$\psi \Rightarrow$ Coeficiente de transformación.

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

Experimentos realizados (Capítulo 2.) demostraron que la relación del área de alimentación de aire secundario respecto al área de los gasificadores.

$$\delta = \frac{A_{\text{secund.}}}{A_{\text{gasif}}} \quad (3.23)$$

$$0,85 \leq \delta \leq 2$$

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

El conducto de alimentación de aire principal debe de estar en una relación con respecto al área de gasificación (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.

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

3.3.1 - 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.

3.3.2 - Forma geométrica de la Cámara de Combustión.

1. Prismática.
2. Cilíndrica.

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

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

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

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

$A_{cám}$) y la altura de la cámara tiene que tomar en consideración la profundidad a 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.

$$H_{cám} = H_{comb} + H_{vacío} + H_{olla} \quad (3.24)$$

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

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.

$$A_{gasif} = 0,3 : 0,7 \cdot A_{cám} \quad (3.25)$$

$$A_{cond} \leq 0,20 \cdot A_{gasif} \quad (3.26)$$

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,

$$\delta = \frac{A_{secund}}{A_{gasif}} = 0,85 : 2 \text{ y la relación } \lambda_{eq} = \frac{A_{gasif}}{A_{cám}} = 0,3 : 0,7.$$

En las figuras 3.4 y 3.5, se muestran distintos tipos de gasificadores.

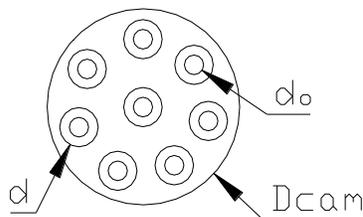


Figura 3.4

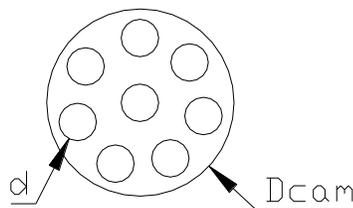


Figura 3.5

Para la figura (3.4), se utiliza la siguiente ecuación.

$$A_t = A_{gasif} + A_{secund} \quad (3.27)$$

$$A_t = \frac{z_1 \cdot \pi \cdot d^2}{4} + \frac{z_2 \cdot \pi \cdot d_0^2}{4}, \text{ (m}^2\text{)}$$

Para el caso de la figura (3.5) se utiliza la siguiente ecuación.

$$A_t = A_{gasif} = \frac{z \cdot \pi \cdot d^2}{4}, \text{ (m}^2\text{)} \quad (3.28)$$

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.

$$A_{cám} = \frac{\pi \cdot D_{cám}^2}{4}, \text{ (m}^2\text{)} \quad (3.29)$$

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

$$A_{cám} = L \cdot A, \text{ (m}^2\text{)} \quad (3.30)$$

La variante (fig.3.4) 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 (macro 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

$$\left(\lambda = \frac{A_t}{A_{comb}}\right) \text{ y } \delta = \frac{A_{secund}}{A_{gasif}}.$$

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

3.3.3 - 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.
2. Elección de los coeficientes $\lambda_{eq} = \frac{A_{gasif}}{A_{cám}} = 0,3 : 0,7$ y $\delta = \frac{A_{secund}}{A_{gasif}} = 0,85 : 2$.
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.

$$H_{comb} = \frac{V_{comb}}{A_{cám}}$$

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

$$H_{vacío} \geq 0,6 \cdot H_{comb} \quad H_{cám} \geq 1,6 \cdot H_{comb} + H_{olla}$$

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 (Hendidadas o Planas) metálicas.
9. La leña en trozos o las briquetas de biomasa residuales, no superiores a 150mm de longitud y diámetros inferiores a 120mm.

3.4 - DISEÑO DE PROTOTIPO DE FOGÓN GASIFICADOR.

3.4.1 - Principio de la multitubularidad.

El diseño de un fogón con el principio de la Multitubularidad... Comienza por el conjunto que asegura el proceso de gasificación y combustión de modo que el número y dimensiones 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 $\delta = \frac{A_{secund}}{A_{gasif}} = 0,85 : 2$. $\lambda = 1$ $z = 4 : 9$

$$\lambda = \frac{d}{D} eq = \sqrt{z} \frac{d}{D} = 0,3 : 0,7$$

$A_{gasif} = \frac{z \cdot \pi \cdot d^2}{4} \left[1 - \left(\frac{d_0}{d} \right)^2 \right]$ Con conductos de aire secundario incluido. 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.

$$\lambda_{eq} = 0,3 : 0,7 ; \delta = 0,85 : 2$$

$$0,3 \leq \lambda_{eq} \leq 0,7 ; 0,85 \leq \delta \leq 2$$

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

Donde:

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

$$3 \leq z \leq 9$$

3.4.2 - Ejemplo de cálculo.

1. Asumir preliminarmente $z = 5$; $d = 100\text{mm}$; $D = 560\text{mm}$, conducto de aire secundario vinculado con el gasificador.
2. Determinar, $\left(\delta = \frac{A_{secund}}{A_{gasif}} \right)$

$$A_{secund} = \frac{\pi \cdot d_0^2}{4} \cdot z_2$$

Donde:

$d_0 = 0,06\text{m} \Rightarrow$ Diámetro del conducto de aire vinculado al gasificador, (m).

$z_2 = 5 \Rightarrow$ Número de conductos de aire secundario.

$$A_{secund} = \frac{\pi \cdot 0,06^2}{4} \cdot 5$$

$$A_{secund} = 0,01414 \text{ m}^2$$

$$A_{gasif} = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \left[1 - \left(\frac{d_0}{d} \right)^2 \right] \cdot z_1$$

$$A_{gasif} = \frac{\pi \cdot 0,1^2}{4} \left[1 - \left(\frac{0,06}{0,1} \right)^2 \right] \cdot 5$$

$$A_{gasif} = 0,02513m^2$$

$$\delta_{calculado} = 0,56 < \delta_{mín} = 0,85$$

3. Asumir $\delta = 1$

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

$$A_{secund} = 0,02513m^2$$

4. Recalcular el número de conductos de aire secundario necesario con diámetro (d_0), o determinar nuevas dimensiones para los no vinculados con los gasificadores, partiendo del área diferencial.

$$A_{dif} = A_{gasif} - A_{secund} = 0,02513 - 0,01414$$

$$A_{dif} = 0,01099m^2$$

Si se conserva $d_0 = 60mm$

$$z_2 \cdot \frac{\pi \cdot d_0^2}{4} = A_{dif}$$

$$z_2 = \frac{4 \cdot A_{dif}}{\pi \cdot d_0^2} = \frac{4 \cdot 0,01099}{\pi \cdot 0,06^2} = 3,88$$

$z_2 = 4$ (Número de conductos adicionales para satisfacer $\delta \geq 1$)

Los conductos z_2 adicionales, de diámetro $d_0 = 60mm$ 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.

5. Determinación de $\lambda_{eq} = \frac{d}{D} eq = \sqrt{z} \cdot \frac{d}{D}$.

$$d = 100mm$$

$$z = 5$$

$$D = 560\text{mm}$$

$$\lambda_{eq} = \sqrt{5} \cdot \frac{100}{560} = 0,35$$

$$\lambda_{eq} = 0,40 > \lambda_{eq_{min}} = 0,3$$

6. Determinación de la altura del fogón.

$$H_{\text{máx}} = 880\text{mm}$$

$H_1 = 100\text{mm} \Rightarrow$ Altura del nivel del piso a la base del **cenicero**.

$H_2 = 160\text{mm} \Rightarrow$ Altura del cenicero hasta el nivel de la parrilla.

$H_{\text{hornilla}} = 260\text{mm} \Rightarrow$ Profundidad de penetración de la hornilla recuperativa.

$H_{\text{gasif}} = 220\text{mm} \Rightarrow$ Altura de los gasificadores.

$H_{\text{vacío}} = 140\text{mm} \Rightarrow$ Altura de los gasificadores, del comienzo de la hornilla al fondo de la olla, existe una altura de 60mm que se suma a los 140mm de **vacío** para la combustión de los gases combustibles, más un conducto de 65 x 240mm alrededor de la hornilla que completan la combustión total de los gases combustibles, antes de salir de la cámara de combustión.

7. Con la altura del gasificador $H_{\text{gasif}} = 220\text{mm}$, diámetro de la cámara de combustión $D = 640\text{mm}$, número de gasificadores $z_1 = 5$, y su diámetro $d = 100\text{mm}$, así como los conductos adicionales $z_2 = 4$; $d_0 = 60\text{mm}$, conectados a los bordes de la parrilla. La densidad natural de la cáscara de café (Combustible principal a utilizar) $\rho_{0_{\text{café}}} = 250\text{kg}/\text{m}^3$.

Determinar la masa de combustible en la cámara de combustión.

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

$$A_{efc} = \frac{\pi \cdot 0,560^2}{4} - \left[\frac{\pi \cdot 0,1^2}{4} \cdot 5 + \frac{\pi \cdot 0,06^2}{4} \cdot 4 \right]$$

$$A_{efc} = 0,1957 m^2$$

Volumen efectivo.

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

$$V_{efc} = 0,1957 \cdot 0,22$$

$$V_{efc} = 0,043 m^3$$

Masa de combustible.

$$w_{comb} = \rho_{0C.Café} \cdot V_{efc}$$

$$w_{comb} = 250 \cdot 0,043$$

$$w_{comb} = 10,75 kg$$

8. Con $\left(\lambda_{eq} = \frac{d}{D} eq = 0,4 \right)$ determinar el coeficiente de transformación de la biomasa

ψ En la **tabla 3.2** para Cáscara de Café $\psi \approx 0,73$ (interpolando).

9. Masa de combustible que efectivamente se transforma en gas combustible.

$$w_{gasif} = \psi \cdot w_{comb}$$

$$w_{gasif} = 0,73 \cdot 10,75$$

$$w_{gasif} = 7,84 kg$$

10. Determinación de la Energía aportada por el combustible (Gasificado).

$$E_{comb} = V_g \cdot w_{gasif}$$

$$E_{comb} = 3733 kJ / kg \cdot 7,84 kg$$

$$E_{comb} = 29266,72 kJ$$

Donde:

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

11. Determinación de la Potencia Media.

$$N_{gasif} = 0,06 \cdot V_g \cdot ICP$$

$$N_{gasif} = 0,06 \cdot 3733 \cdot 42$$

$$N_{gasif} = 9407,16 \frac{kJ}{kg} = 2,61 kW$$

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

$$ICP = 90,31 \cdot 0,345 + 10,69$$

$$ICP = 42 \frac{g}{min}$$

$$A_{gasif} = z_1 \cdot \pi \cdot H_{gasif}$$

$$A_{gasif} = 5 \cdot \pi \cdot 0,22$$

$$A_{gasif} = 0,345 m^2$$

12. Determinación del tiempo de autonomía de la combustión sin carga adicional.

$$t = \frac{E_{comb}}{N_{gasif}} = \frac{29266,72}{9407,16} = 3,11 h$$

13. Determinación de las dimensiones del conducto de aire de alimentación principal.

$$A_{alim} \leq A_{gasif} + A_{secund} \cdot 0,2$$

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

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

$$A_t = 2 \cdot 0,02513$$

$$A_t = 0,05026 \text{ m}^2$$

$$A_{a\text{lim}} \leq 0,01 \text{ m}^2$$

$$\frac{\pi \cdot d_a^2}{4} \leq 0,01$$

$$d_a \leq \sqrt{\frac{4 \cdot 0,01}{\pi}}$$

$$d_a \leq 113 \text{ mm}$$

$$d_a = 100 \text{ mm}$$

14. Determinar las dimensiones de la hornilla recuperativa hendida en función de la olla de mayor diámetro y con la facilidad de aprovechamiento del calor por el fondo y por los laterales.

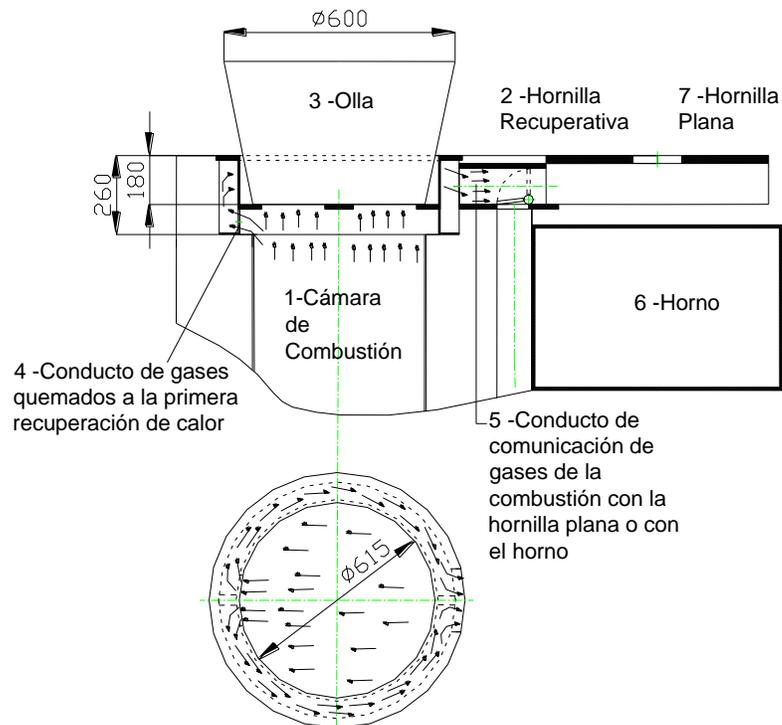


Figura 3.6 Dimensiones de la Hornilla Recuperativa.

El diámetro interior de la hornilla es de 615 mm, para asimilar la mayor olla de 600 mm de diámetro. La olla penetra 180 mm quedando 80 mm por debajo del fondo de la olla para un conducto de 70 mm de altura por 200 mm de ancho ***circunferencial*** que asegura la evacuación de los gases del fondo de la olla al conducto que circunvala la hornilla, formando entre esta y el refractario del fogón cuya magnitud es de 65 x 340 mm y su misión es recuperar el calor en la hornilla hendida en un movimiento contrario al flujo provocado por el tiro de la chimenea y conducir los gases aún calientes a la hornilla plana o al horno para su segunda recuperación del calor. Como puede apreciarse la sección de los conductos presenta un área semejante en todos los casos igual o superior a 0,014 m².

15. Considerar un área de evacuación en todos los elementos del fogón igual o superior al área del conducto principal de alimentación de aire ($A_{\text{conducto}} = 0,01\text{m}^2$).
16. Para aumentar la potencia y la energía térmica en la hornilla plana o el horno.
 - a) Alinear el conducto de evacuación de los gases de la combustión de la parte inferior de la hornilla al flujo normal del tiro de la chimenea (girando 180° la hornilla respecto a la posición indicada en la figura (3.6).
 - b) Sustituir la hornilla recuperativa por una hornilla plana, que asegure el cierre de la cámara de combustión y garantice que el calor alcance el fondo de la olla en este lugar y a la hornilla plana establecida o al horno.

3.5 – FACILIDADES DEL FOGÓN DISEÑADO.

I. Ahorro considerable de componentes metálicos en su estructura principal.

- Utilización de un tanque de 55 galones para la formación de la cámara de combustión, con revestimiento exterior de arcilla y cemento refractario o arcilla y aserrín fino de madera. El cuerpo exterior del fogón puede ser de bloques de cemento o ladrillos de cualquier característica, las paredes divisorias interiores deben ser de planchas de acero de 8mm de espesor o de ladrillos refractarios (La cámara de combustión puede ser de ladrillos refractarios).
- Se utilizarán planchas de acero CT-3 de 3 y 8 mm de espesor para las hornillas recuperativas y para el horno, la parrilla será concebida de cabillas de acero 1/2

y 3/4 de pulgadas. La utilización de materiales metálicos, puede ser reducida al mínimo posible (Fogón Rústico).

II. 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 del fogón con cualquier biomasa (briquetas macizas o tubulares, leña en trozos, hojas de árboles, cereales, cáscara de arroz, cáscara de café, aserrín de madera, etc.).

III. Elevada eficiencia térmica de la instalación y del sistema térmico.

- Aislamiento adecuado de la cámara de combustión.
- Utilización de las hornillas recuperativas (Hornilla Hendida).
- Recuperación del calor en la hornilla hendida, en la hornilla plana y en el horno.
- Organización adecuada del proceso de cocción de alimentos.
- Regulación del proceso de gasificación-combustión, según las exigencias de la aplicación (Regulación del aire de alimentación, regulación de la chimenea o ambos simultáneamente).

IV. Facilidad de sustitución o transformación de:

- Parrilla del combustible.
- Hornilla recuperativa o plana.
- Conducto de distribución de gases de la combustión, a la hornilla plana o al horno.
- Puerta del horno, de alimentación de combustible y de evacuación de las cenizas.
- Chimenea.

3.6. MEMORIA DESCRIPTIVA DEL FOGÓN GASIFICADOR (FFUND: II 00 - 00 - PE).

El fogón gasificador constituye un artículo de primer orden, formado por 9 unidades de primer orden, 4 de las cuales se replican como se puede observar en el documento de especificaciones técnicas y 11 tipos de piezas con sus correspondientes réplicas como se muestra en el documento precedente.

1. FFUND: II 01 - 00 - PE, Representa el cuerpo del fogón gasificador, construido en su estructura principal por bloques de cemento de 10cm, ladrillos normales o refractarios (Parte externa), con dos divisiones interiores para separar las dos cámaras de combustión, situadas en las dos partes extremas del horno central. En su parte central posterior se adiciona la cámara de evacuación de los gases que se encargan de acopiar los gases de la combustión después de pasar por la hornilla plana y/o el horno. En las paredes, frontal y posterior del fogón se muestran los conductos rectangulares para los ceniceros de las dos cámaras de combustión y para la evacuación de los gases de la cámara posterior respectivamente. En las partes laterales se muestran los conductos para la alimentación del combustible.

2. FFUND: II 02 - 00 - PE, Gasificadores.

Esta unidad es fundamental para el aseguramiento del proceso de gasificación-combustión, su colocación en la parrilla del combustible tiene la finalidad de provocar la multitubularidad del colchón de combustible en la parrilla, 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 biomásas de alta granulometría).

3. FFUND: II 03 - 00 - PE, Hornilla Recuperativa.

La hornilla recuperativa, se caracteriza por penetrar en la cámara de combustión y hacer que la olla de cocción de alimentos penetre conjuntamente, asegurando un aprovechamiento del calor de forma directa, en el fondo de la olla y por radiación por los laterales de la misma, gracias a la orientación obligada del flujo de gases de la combustión a un conducto formado entre el cuerpo del fogón y la parte lateral de la hornilla recuperativa (Dirección del flujo, contrario al tiro de la chimenea). Este efecto constituye la primera recuperación del calor de los gases de la combustión. Los gases de la combustión que se dirigen a la hornilla plana o al horno, aseguran la segunda recuperación del calor de los mismos y posibilitan que estos dispositivos solo puedan mantener la temperatura de los alimentos. No obstante si la hornilla recuperativa se gira 180° de la posición anterior,

asegurando que el conducto de salida de los gases de la misma se oriente al flujo normal (Flujo provocado por la chimenea), la primera recuperación del calor tiene lugar en la hornilla plana o en el horno, y ello puede elevar la temperatura a valores que aseguren la cocción de los alimentos, de igual forma que en la hornilla recuperativa. El mismo efecto se logra si se extrae la hornilla recuperativa y en su lugar se sitúa una hornilla plana que obstruya la cámara de combustión.

4. FFUND: II 04 - 00 - PE, Dispositivo de distribución de los gases de la combustión a la hornilla plana o al horno, después de salir de la hornilla recuperativa.

Este dispositivo es un conducto de sección rectangular, con una válvula de derivación del flujo, que puede ser manipulada desde la parte frontal del fogón, según las necesidades de la cocción de los alimentos en la hornilla plana o del horno.

5. FFUND: II 05 - 00 - PE, Horno.

Constituye una caja prismática de planchas de acero (Preferiblemente inoxidable), que se sitúa en la parte central del fogón, separada en la porción posterior de la pared del mismo y comunicada con la parte frontal, para asegurar su funcionalidad, por su lado superior se cubre de refractario para formar el conducto de gases de la combustión debajo de la hornilla plana, por los laterales, fondo y parte posterior, existe contacto físico con los gases de la combustión, que son obligados a moverse por todas estas superficies (Siempre que se oriente el flujo de gases a este dispositivo).

6. FFUND: II 06 - 00 - PE, Soporte de la Chimenea.

Estructura piramidal de planchas de acero que terminan en su porción superior en un conducto de corta longitud para recepcionar la chimenea. Este conjunto sirve de cúpula a la cámara de evacuación de los gases de la parte inferior de la hornilla plana y del horno (Después de su instalación recubrir con arcilla).

FFUND: II 07 - 00 - PE, Puerta del Cenicero. Esta unidad se abisagra al cuerpo del fogón para ocasionalmente extraer la ceniza acumulada en la parte inferior

de la cámara de combustión. Además en su parte central presenta un conducto de 100mm de diámetro interior y un dispositivo de regulación del aire de alimentación al fogón, para la garantía del proceso de gasificación y de combustión de los gases combustible.

7. FFUND: II 08 - 00 - PE, Puerta del Horno.

Articulada en la parte inferior del horno, tiene la misión de conservar la temperatura en el interior del horno y facilitar la introducción y extracción de recipientes o tártaras utilizadas en el horneado (Abre hacia abajo).

8. FFUND: II 09 - 00 - PE, Parrilla para el combustible.

Construida de barras de acero (1/2" y 3/4"), con un conducto central de corta longitud y 70mm de diámetro interior (Para recepcionar al gasificador), y conectada con barras en forma de cruz, en cada uno de los cuales se sitúa al mismo asiento de los gasificadores (4). Limitada en su parte periférica por una barra circular, donde se sueldan las barras de los 4 gasificadores periféricos y una malla fina que cubre los espacios dejados por las cuatro barras, los asientos de los gasificadores impiden que la biomasa de pequeña granulometría caiga en la misma.

9. FFUND: II 00 - 01, Conductos de aire secundario adicionales.

Son conductos de 60mm de diámetro interior que comunican la parte inferior de la parrilla con la parte superior de la cámara de combustión, con el propósito de trasladar la fracción de aire que corresponde en la distribución que tiene lugar en la parte inferior de la parrilla, a la combustión de los gases combustibles del proceso de gasificación. Su ubicación no interrumpe el proceso el proceso en la cámara de combustión.

10. FFUND: II 00 - 02, Cubierta de la Cámara de Combustión.

Esta pieza es un tanque de 55 galones y 560mm de diámetro interior, que se sitúa para formar la cámara de combustión, dispone de gradaciones para los conductos de aire secundario (Parte inferior y superior), así como para la

alimentación del combustible y extracción de las cenizas. La parte exterior de este depósito se rellena de arcilla con aserrín fino para el aislamiento necesario de la cámara de combustión.

- 11.FFUND: II 00 - 03, Hornilla Plana.
- 12.FFUND: II 00 - 04, Chimenea de 160mm de diámetro interior y 7m de altura (Material de Aluminio).
- 13.FFUND: II 00 - 05, Tapa de cierre de la ventana para el combustible.
- 14.FFUND: II 00 -06, Guía para tapa de cierre de la ventana para el combustible.
- 15.FFUND: II 00 - 07, Soporte de la Parrilla.
- 16.FFUND: II 00 - 08, Pasadores de la puerta del Cenicero.
- 17.FFUND: II 00 - 09, Orejas para la puerta del Cenicero.
- 18.FFUND: II 00 - 10, Orejas para la puerta del Horno.
- 19.FFUND: II 00 - 11, Pasadores para puerta del Horno.

3.7.- Conclusiones parciales

1. El sobre consumo de leña en los fogones que se utilizan en la actualidad, está determinado por un diseño inapropiado, por indebida organización del combustible y del proceso de cocción de los alimentos.
2. Con el empleo de una parrilla, igual a la mitad de la longitud de la cámara de combustión, un talud inclinado desde esta a la última hornilla y conductos de aire secundario, que asimilan parte del aire de alimentación que entra a la cámara de combustión. Se asegura reducir en un 50% el consumo de leña, lo que equivale a un aumento similar de la eficiencia de la combustión.
3. La definición del modelo exponencial de la pérdida de masa en briquetas tubulares y/o multitubulares permitió determinar el índice de transformación (Gasificación) en función de la Multitubularidad del combustible.
4. El aporte fundamental de energía corresponden a los gases combustibles, de ahí la importancia de su valor calórico.
5. El índice de combustión promedio por unidad de área perimetral del conducto de gasificación, es fundamental para la determinación de la potencia térmica del fogón.

6. El concepto de Multitubularidad se puede aplicar a cualquier combustible sólido utilizado.
7. El proceso de gasificación puede ser regulado, regulando el aire de alimentación.
8. Se obtuvo una metodología para el diseño de fogones gasificadores.

CAPÍTULO 4.- FACTIBILIDAD ECONÓMICA Y AMBIENTAL.

4.1. ANÁLISIS ECONÓMICO

El presente epígrafe muestra el Estudio de Factibilidad económica de fabricación del fogón gasificador en el Comedor obrero de la EMA de Cumanayagua, teniendo en cuenta que su objetivo central es garantizar que la necesidad de acometer la inversión señalada, esté plenamente justificada y que las soluciones técnico-económicas sean las más ventajosas para la empresa procurando:

- La óptima utilización de los recursos materiales y humanos.
- Los mejores resultados en la Balanza de Pagos.
- Una elevada eficiencia económica.
- Garantizar que los planes previstos para la ejecución y puesta en explotación respondan a las posibilidades y necesidades de la economía empresarial.

En este estudio de factibilidad se han valorado las variantes seleccionadas desde el punto de vista técnico, económico y financiero, y se ha definido la conveniencia y factibilidad de su ejecución.

La evaluación Económica y Financiera constituye el punto culminante del Estudio de Factibilidad, pues mide en qué magnitud los beneficios que se obtienen con la ejecución del proyecto superan los costos y gastos para su materialización. El resultado de estas evaluaciones constituye un índice importante para el ordenamiento de los proyectos en correspondencia con su rentabilidad y aporte a la economía empresarial.

Se debe tener en cuenta que no es suficiente lograr un proyecto de inversión con resultados económicos y financieros favorables, sino, que se trate de alcanzar en la ejecución y explotación del mismo, los mayores resultados posibles en el más corto plazo de tiempo en cuanto al aporte neto a la empresa.

4.2. Ingeniería básica.

4.2.1. Origen y forma de adquisición.

La solución tecnológica adoptada se establece como resultado del convenio de colaboración de la UCf y la entidad referida, como parte del Proyecto “Plan Montaña” .

El mismo consta de una cocina - comedor con capacidad de 150 comensales.

4.2.2. Consumo energético.

La cocina - comedor para su funcionamiento requiere de la instalación trifásica de 220V, para un consumo energético, a plena producción, de 16 kw/h.

4.2.3. Descripción del proceso tecnológico.

Esta cocina - comedor utiliza un sistema de elaboración de alimentos continuo desde las 7 a 12 meridianos, todos los días.

4.2.4. Demanda.

Se entiende por demanda la cantidad de bienes y servicios que el mercado requiere para buscar la satisfacción de una necesidad específica, a un precio determinado y teniendo en cuenta la capacidad de producción, en éste caso la demanda se encuentra determinada por los clientes que conforman los trabajadores de la Empresa. Por ésta razón no se precisa de un Estudio de Mercado, ya que cualquiera que sean los volúmenes de producción, se tendrán clientes estables para asumirlos.

4.2.5. Fuerza de Trabajo.

La fuerza de trabajo de la instalación proviene de la zona donde se encuentra ubicada la cocina comedor, favoreciendo a la comunidad la obtención de fuente de empleo. Estimando la construcción de las obras inducidas necesarias para la eficiente y eficaz productividad de la empresa y la distribución equitativa considerada para la fuerza de trabajo de la misma, se consideran y distribuyen la cantidad de trabajadores por área:

ÁREA	CANTIDAD
Cocina - Comedor	8
Indirectos	2

Total	10
-------	----

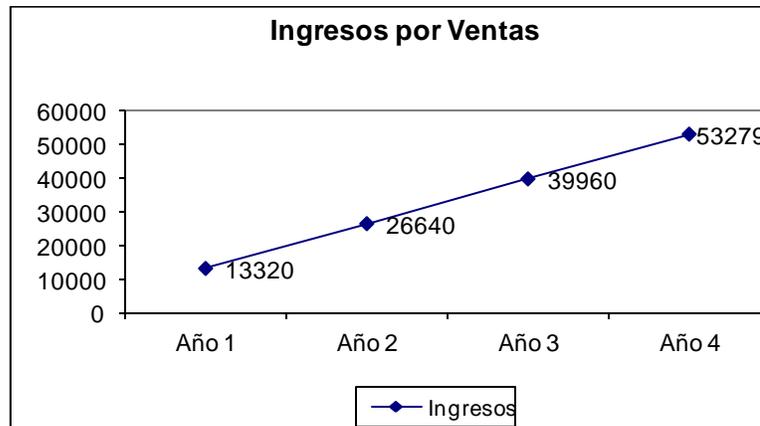
4.3. Distribución de las producciones.

En la actualidad se elaboran 345 600 raciones anuales; teniendo en cuenta las producciones obtenidas a partir de los cálculos de la Ingeniería Básica, se espera mantener la cifra actual, sin incrementos en los próximos 4 años.

4.4. Ingresos por ventas.

La estimación de los ingresos que generará la inversión constituye un aspecto fundamental de la evaluación económica financiera, por cuanto depende de ellos la rentabilidad de la misma. En éste acápite se analizarán los Ingresos por Ventas de **N** cantidad de raciones, alrededor de las cuales se esperan obtener grandes volúmenes de los mismos.

El incremento paulatino de los valores de ingresos por ventas se muestra en el gráfico siguiente para la Instalación del Estudio:



4.5. Costos de Inversión.

Los costos de inversión están formados por el Capital Fijo y el Capital de Trabajo. El capital fijo está constituido por los recursos requeridos para construir y equiparar un proyecto de inversión y el capital de explotación (capital de trabajo) corresponde a los recursos necesarios para explotar el proyecto en forma total o parcial.

4.5.1. Capital fijo.

El capital fijo se determinó a partir del costo de fabricación, cuyos principales elementos expresados en forma monetaria son:

- a. El valor de las materias primas.
- b. Materiales auxiliares empleados en la fabricación del Fogón.
- c. Los gastos relacionados con el trabajo humano.
- d. La parte de los activos fijos tangibles que se transfiere en forma de depreciación.
- e. El valor de la energía consumida.
- f. Los gastos indirectos y otros gastos.

4.5.1.1. COSTO DE FABRICACIÓN DEL FOGÓN GASIFICADOR.

El costo de materiales fue determinado tomando en cuenta su precio de adquisición y la cantidad de unidades utilizadas.

Tabla 4.1 Listado de Materiales.

DESIGNACIÓN	MATERIAL	UM	CUC	CANT.UTIL.	CUC
Plancha 3x2000x6000	Acero 20	T	378.00	0.28	106.14
Plancha 8x1500x4500	Acero 20	T	378.00	0.08	30.19
Plancha 25x1500x4500	Acero 20	T	378.00	0.095	36.12
Tubo sin costura 70x5	Acero 35	UN	46	1	46.00
Tubo sin costura 110x5	Acero 35	UN	87.5	1	2.16
Barras de D=20mm	Acero 35	T	400	0.008	3.20
Bloques de 15 cm	Cemento de Arena	UN	0.6	150	90.00
Ladrillos Refractario 110x230	Arcilla Refractaria	UN	0.6	150	90.00
Bolsa de Cemento P-350	Cemento P-350	UN	5	3	15.00
Bolsa de Cemento Refractario	Cemento Refractario	UN	6	2	12.00
Costos Sub. - Total					430.67

4.5.1.2. Costos de materiales auxiliares.

Durante el proceso de soldadura se utilizaron:

Tabla 4.2 Costo de Electrodo.

DESIGNACIÓN	MATERIAL	UM	CUC	CANT.UTIL.	CUC
Electrodo	Acero	T	912.00	0.005	4.56
Recargo 10%					0.45
Costo Total					5.11

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

Tabla 4.3 Costo de Oxígeno y Acetileno.

DESIGNACIÓN	UNIDADES	COSTO/UN (CUC)	COSTO TOTAL (CUC)
Balón de Oxígeno	1	1.5	1.5
Balón de Acetileno	1	3.6	3.6
Sub. - Total			5.1
Recargo 10%			0.51
Costos Total			5.61

Gasto en salario.

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

Tabla 4.4 Gasto de Salario.

OBRERO	TIEMPO (h)	TARIFA HORARIA (Pesos/h)	SALARIO +VAC. (9.09%) (Pesos)	SEGURIDAD SOCIAL (14%)	IMPUESTO DE F.T (25%)	GASTO SALARIO (Pesos)
Soldador B	10	2.02	22.04	3.08	5.51	30.63
Pailero	5	2.02	11.02	1.54	2.75	15.31
Tornero C	5	1.81	9.88	1.38	2.47	13.73
Gasto Total en Salario						59.67

4.5.1.4. Costo de Amortización.

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

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

MÁQUINA	PROCEDENCIA	PRECIO (CUC)	VIDA ÚTIL (h)	AMORT. HORARIA	TIEMPO EFECT.	GASTO (CUC)
Rectificador de Soldadura	Rusia	1748.48	15 000	0.015	10	1.16

Torno 16 K20	Rusia	117 235	20 000	0.305	5	29.30
Equipo de Oxicorte	Rusia	138 60	9 000	0.301	5	7.7
Total						38.16

Tabla 4.5 Amortización de Equipos.

Costo por el consumo de energía eléctrica.

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

Tabla 4.6 Gasto en Electricidad.

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

Total de gastos directos.

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

Gastos Directos = 441 + 38.16 + 34.63 = 513.79 CUC

Gastos Directos = 59.67 = 59.67 PESOS

Total de gastos indirectos.

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

- **Gastos Indirectos = 0.3 x Gastos Directos = 0,3 x 513.79 = 154 CUC.**
- **Gastos Indirectos = 0.3 x Gastos Directos = 0.3 x 59.67 = 17.9 PESOS.**

Costo total de fabricación del fogón.

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

- **Costo de Fabricación CUC = G.D + G.I = 513.79 + 154 = 667.69 CUC.**
- **Costo de Fabricación PESOS = G.D + G.I = 59.67 + 17.9 = 77.57 PESOS.**

4.5.1. Capital de trabajo.

El capital de explotación neto se refiere a los recursos financieros requeridos para iniciar la explotación de una nueva inversión y los incrementos de aprovechamiento de la capacidad anual durante su período de asimilación. Este debe ser suficiente para cubrir la diferencia entre los activos corrientes menos los pasivos corrientes y se toma para cada año el incremento anual respecto al año anterior.

Para su cálculo se debe definir el plazo de cobertura para cada uno de los conceptos o gastos que lo componen en días (días de reserva, de tránsito, de demora u otros que correspondan).

Para éste cálculo se utilizó la **Metodología Automatizada de los Estudios de Factibilidad Económica**, elaborada por el Ministerio de Economía y Planificación.

En el estudio, teniendo en cuenta lo anteriormente explicado cuando se refiere a la distribución de las producciones, éstas se incrementan en un 25 % anual, hasta llegar paulatinamente en 4 años al volumen de producción esperado; motivo por el cual, el Capital de Trabajo no varía en la medida que pasan los años, ya que todos los aspectos

a tener en cuenta para el cálculo del mismo se mantienen invariables, como se muestra en la siguiente tabla: (Anexo No. 11)

Capital de Trabajo	1191.9
---------------------------	--------

4.6. Costos totales de Producción.

Los costos de producción total incluyen todos aquellos gastos que es necesario realizar en el proceso productivo para lograr el producto final y su comercialización. Es uno de los parámetros más importantes dentro de la evaluación financiera por su incidencia permanente en los resultados del proyecto, por lo que es imprescindible su determinación lo más exacta posible.

Se dividen en:

- **Costos directos:** Aquellos costos que son proporcionales al por ciento de aprovechamiento de la capacidad normal viable.
- **Costos indirectos:** Aquellos costos que no son proporcionales al por ciento de aprovechamiento de esa capacidad. Se expresan en valores totales, los cuales pueden variar por año según que se aproveche o no la capacidad total creada.

Este caso se apoya en la Ficha de Costo desglosada por elementos, equivalente a la producción de una ración, a su precio de Venta respectivo y las producciones proyectadas. (Ver Anexo No.10)

Los costos y gastos de operación están conformados por los costos de mercancías, por los gastos de operación integrada por los elementos de gastos, así como otros gastos.

Basado en el análisis efectuado, se puede esclarecer que los costos, de forma general, se incrementarán paulatinamente en el transcurso de los años en particular, de acuerdo a sus respectivos volúmenes de producción.

4.7. Fuentes de financiamiento.

Las decisiones sobre las fuentes de financiamiento a emplear, supuesto el hecho de que se puede seleccionar, es complejo dentro de la evaluación a realizar. En general

debe tratarse de lograr un equilibrio entre las diferentes fuentes de financiamiento para, por una parte no perder independencia por parte de uno de los aspectos más importantes de la empresa, y por otro lado, aprovechar las ventajas del apalancamiento financiero, logrando como resultado la estructura de capital más apropiada para la organización. La empresa tiene una estructura de financiamiento óptima, para la cual no existe método de determinación y que además no implica un nivel de endeudamiento máximo.

4.8. Estados Financieros. (Anexos 12 y 13)

Los estados financieros a elaborar son:

- Estado de Ingresos Netos o Estado de Resultados.

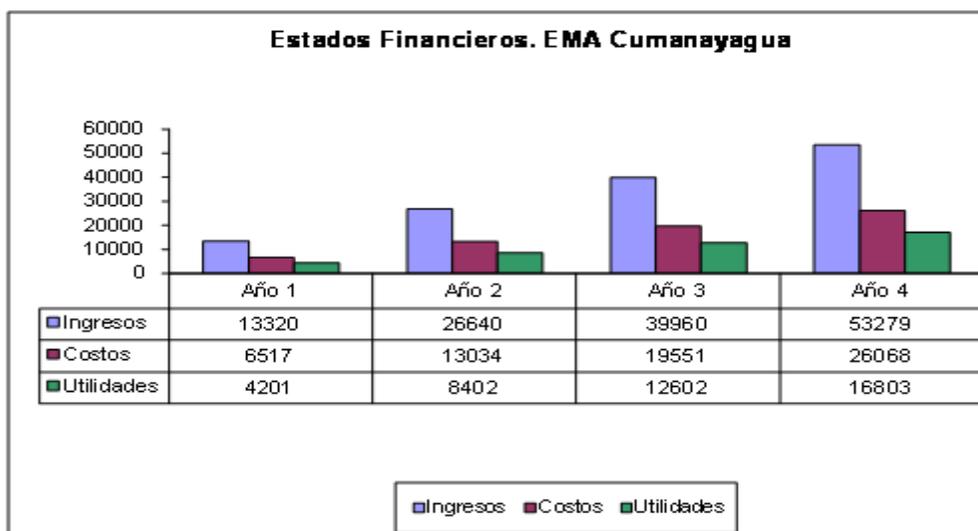
Este análisis permite obtener los ingresos netos (o déficit) en el período de operaciones del proyecto y refleja la rentabilidad económica de la inversión, es decir su capacidad para producir ingresos. Se evalúa para su análisis, lo que permite conocer la rentabilidad económica del proyecto en moneda total. Además de lo anterior, se calcula a partir de las coberturas para cada una de las partidas, la necesidad de financiamiento para el capital de trabajo en los periodos en que se producen incrementos en el nivel de actividad del proyecto.

En la moneda total los resultados son positivos, reflejándose que se trata de un proceso que genera recursos financieros que están asociados con los ahorros que tiene la empresa por la quema de un volumen menor de leña o la utilización de otra biomasa como la cáscara de café con un costo cero, además de un incremento en la eficiencia superior al 43%.

- Flujo de Caja. Análisis de la liquidez

El Flujo de Caja para la Planificación Financiera, permite realizar el Análisis de Liquidez del inversión. Los resultados obtenidos para la Moneda Total son positivos, garantizando que los ingresos provenientes de las fuentes y las ventas planificadas son suficientes para cubrir todos los gastos y las obligaciones financieras contraídas.

La estructura y composición general de estos estados es la que se muestra a continuación y reflejan la certera factibilidad de la inversión. :



4.9. Indicadores Fundamentales del Proyecto. (Anexo No. 14)

4.9.1. Método del Valor Actual Neto (VAN).

El Valor Neto Actualizado o VAN mide el incremento de ingresos que tendrá el inversionista en el futuro si emprende el proyecto. Representa las utilidades totales, actualizadas a una tasa de interés constante, que obtendrá el inversionista en el periodo objeto de análisis. La condición que tiene que cumplir este indicador es el ser mayor que cero o positivo y que a medida que esta cifra sea más significativa más ventajoso será el proyecto.

En otras palabras, éste indicador dice en cuanto se incrementará la riqueza de los inversionistas en caso de ejecutarse el proyecto, además de los elementos de riesgo en todos ellos. En ultima instancia el único criterio absoluto de evaluación es el VAN, al proporcionar una medida directa del beneficio. En este caso el Valor Actual Neto, sin necesitar el financiamiento externo se muestra a continuación:

Valor actual neto (VAN_k).

$$\text{--- (USD). (4.1)}$$

Donde:

Q_i – Flujo neto de caja para el año i .

K – Tasa de retorno anual de la inversión.

N - Vida útil de la instalación en años.

Si el flujo de caja Q_i es constante, en periodo de vida útil de la instalación:

$$\frac{\text{VAN}_K}{K} = \frac{Q_i}{K} \left(\frac{1 - (1 + K)^{-N}}{K} \right) \quad (4.2)$$

$$\text{VAN}_K = 62646.5 \quad (\text{Anexo No.14})$$

4.9.2. Tasa Interna de Retorno (TIR):

La TIR no existe porque se indefine, lo que quiere decir que para cualquier valor de la Tasa de Actualización el VAN es positivo y el Periodo de Recuperación no es relevante en esta variante.

4.9.3. Período de Recuperación (PR).

El Período de Recuperación (PR) es el indicador que mide el número de años que deben transcurrir desde la puesta en explotación de la inversión, hasta recuperar el capital invertido en el proyecto mediante las utilidades netas del mismo, considerando además la depreciación y los gastos financieros. Es decir es el período que media entre el inicio de la explotación hasta que se obtiene el primer saldo positivo. En este caso el período de recuperación comienza a partir del primer año de puesta en marcha la inversión.

4.9.4. Análisis de Sensibilidad.

Debido al grado de incertidumbre que rodea cada proyecto, los pronósticos de la demanda, la producción y las ventas pueden no corresponder con la realidad, tanto como la estimación de la inversión total, los costos de producción, como los precios, entre otros. En definitiva todos estos parámetros se comportan como variables aleatorias, es decir que se comportaran según determinada probabilidad.

Es por todo ello que es necesario evaluar en que medida influyen en los indicadores finales del proyecto, posibles variaciones en las utilidades consideradas, por lo que es

necesario evaluar el riesgo ante esos posibles cambios. Para dar respuesta a este problema se realizan el **Análisis de Sensibilidad y el Análisis de Escenarios**.

Mediante el **Análisis de Sensibilidad** se mide cuan sensible es el proyecto a cambios en sus variables, es decir, el efecto que tienen estas en los indicadores fundamentales.

La variante de proyecto presentada (en horizonte de certeza), se somete a las variaciones de las diferentes variables y se determina cuáles son aquellas cuya modificación mayor o menor puede hacer peligrar la factibilidad del proyecto. Normalmente se mide la sensibilidad ante cambios en los precios de venta, volumen de ventas, costo de insumos y otros. En este caso se asumió la sensibilidad ante los Ingresos.

Para solucionar esto se realiza el **Análisis de Escenarios**, comúnmente se diseñan escenarios pesimista, optimista y normal, coincidiendo este último con la evaluación hecha en horizonte de certeza y que sirve de base al análisis. Para lograr estimar la sensibilidad de la inversión se incrementará en un 10 % los ingresos por ventas en el escenario optimista y para el escenario pesimista se disminuirá en el mismo valor. Considerando los resultados obtenidos se espera que las Utilidades fluctúen de la siguiente forma al principio y final del período comprendido:

Lógicamente y como lo ilustran los valores, en el escenario optimista donde se incrementan los ingresos, las utilidades generadas en el período analizado son mucho mayores que en el escenario pesimista. Esto se encuentra dado y una vez demuestra que en la medida en que se aumentan los ingresos por ventas éstos proporcionalmente elevan el nivel de utilidades brutas a la entidad. No obstante, en ambos escenarios pesimista y optimista, la Fuente de Financiamiento será la misma que en la del escenario proyectado, lo que nos dice que ésta es una muestra de cuán factible es la inversión prevista, teniendo en cuenta que ni disminuyendo las producciones e ingresos proporcionalmente en un 10 % se afectarán los niveles de ingresos y utilidades a obtener para enfrentar la transformación prevista.

4.10. ANÁLISIS AMBIENTAL.

La multiplicidad de procesos presentes en las actividades de captación, transformación y uso de la energía tiene una incidencia significativa sobre el medio ambiente, tanto cualitativa como cuantitativamente. En este contexto, las denominadas tecnologías renovables representan en general y por su propia naturaleza, una opción ventajosa. Los procesos de combustión, normalmente los de mayor impacto, sólo están presentes en el caso de la biomasa, que presenta a cambio ciertas ventajas frente a las opciones convencionales. Además, el carácter de las fuentes primarias renovables, en general dispersas e inagotables, hace que presenten menores necesidades de transformación y transporte y ello explica también sus menores efectos globales. Los análisis comparativos con tecnologías convencionales son, desde este punto de vista y como se verá a continuación, claramente favorables a las tecnologías renovables, aunque ello no signifique la ausencia total de impactos asociados a su utilización. Respecto a los impactos de ámbito global, la lluvia ácida, el cambio climático, el aumento del ozono troposférico y la reducción del ozono estratosférico, constituyen en conjunto impactos en los que intervienen un variado grupo de compuestos emitidos principalmente durante los procesos de combustión. Destacan entre estos compuestos el dióxido de carbono, el dióxido de azufre y los óxidos de nitrógeno, junto a otros como el monóxido de carbono, el metano y los compuestos orgánicos volátiles.

La agricultura, además de constituir la más importante fuente de alimentos y materia prima para Cuba, es un componente estratégico del desarrollo de las fuentes renovables de energía en la búsqueda de soluciones técnicas y económicamente viables a las necesidades energéticas.

En la agroindustria azucarera, para una zafra de siete millones de toneladas de azúcar hay que moler sesenta millones de toneladas de caña, que producen 17,5 millones de toneladas de bagazo y una cantidad similar de residuos agrícolas cañeros paja y cogollo, que se separan en los centros de acopio y limpieza.

Históricamente el bagazo, a pesar de la ineficiencia con que por lo general se utiliza, ha cubierto 30 % de las necesidades energéticas del país. Desde el punto de vista de su aprovechamiento energético, el uso integral y eficiente de una zafra permitiría disponer

del equivalente de millones de toneladas de combustible convencional cada año, en forma de portadores renovables.

Esta realidad, junto al Sistema Electroenergético Nacional desarrollado por la Revolución Socialista, que constituye una verdadera columna vertebral energética, si se le incorpora la cogeneración posible con altísima eficiencia en las más de setenta fábricas de azúcar y destilerías, constituye sin duda la solución energética sustentable y limpia para nuestro país.

El potencial de leña existente, explotable con fines energéticos sin peligro a romper el equilibrio ecológico, se calcula en 3,5 millones de metros cúbicos al año y es mayormente de uso local; no se encuentra distribuido uniformemente; se concentra en las zonas montañosas, costas y cayos. En la actualidad a siete provincias y la Isla de la Juventud corresponden el 73 % del potencial nacional.

Otras biomásas combustibles se ubican localmente con variado potencial; el más significativo resulta la cáscara de arroz, y en menor medida el aserrín y la viruta, el afrecho de café, las cáscaras de coco y otras.⁴

4.10.1. Potencial de biomásas residuales y su impacto medioambiental.

Las potencialidades utilizables de biomásas residuales del país pueden alcanzar 2,5 millones de toneladas, lo que puede representar el equivalente a 10 000 hectáreas de bosques (Una hectárea de bosques puede aportar entre (150 – 250) T/ha de madera) que se evitarían talar para ser empleados como combustibles alternativos en las ineficientes tecnologías de combustión existentes actualmente (Eficiencias de los sistemas de combustión, inferiores al 20%). Si se utilizan tecnologías de combustión empleando el principio de la multitubularidad provocada que garantiza niveles medios de eficiencia en el sistema térmico superiores al 40%, ello puede equivaler a la protección aproximada del doble de las hectáreas de bosques que se necesitarían para satisfacer las ineficientes tecnologías de combustión actuales. El país actualmente tiene una demanda de leña para usos energéticos de 3 500 000 m³/ año, (según el

⁴ Colectivo de autores., “Suplemento especial (Cuba Energía),” *Editorial Academia*, 2004

suplemento especial de Cuba energía), equivalente a 10 500 ha/año que representan la misma cantidad de hectáreas de bosques equivalentes, si se emplea la tecnología de la multitubularidad provocada en los sistemas de combustión actuales, lo que demuestra la posibilidad real de la sustitución total de la leña por las biomásas residuales, con el empleo de tecnologías de combustión eficientes esta posibilidad se fortalece, sin embargo las disponibilidades de estos recursos no siempre son factibles para su empleo, dado a su temporabilidad y localización así como la insuficiente infraestructura técnica y tecnológica disponible para su implementación, sin embargo donde existan abundantes potenciales de biomásas residuales, puede resultar muy apropiada esta tecnología, para la garantía de preservar el recurso combustible y su posterior uso como combustible alternativo en lugares remotos.

Si la única alternativa posible es el uso de la leña, conviene que las tecnologías de combustión posean los más altos niveles de eficiencia, ello repercutirá favorablemente en el uso racional del recurso leña y por consiguiente la recuperación de los bosques puede realmente ser posible.

Si se suma a la utilización de los recursos forestales con gran racionalidad y eficiencia, las biomásas residuales utilizadas en cualquier estado (densificada y sin densificar). La recuperación de la foresta dejará de ser un sueño para convertirse en una hermosa realidad.

Conclusiones parciales

1. Se plantea un costo relativamente bajo del Fogón Gasificador.
2. Posibilidad del diseño de adecuarse a los requerimientos y disponibilidad financiera de los usuarios.
3. Rápida recuperación de la inversión y bajo impacto medioambiental, dado a que pueden ser utilizado combustibles sin costo agregado.
4. Teniendo en cuenta la demanda potencial insatisfecha del mercado en cuestión y dadas las perspectivas de crecimiento, así como el ahorro con el que contribuye al país, la puesta en marcha de esta inversión es factible, ahorrando grandes volúmenes de leña.

5. Los resultados obtenidos en el presente estudio demuestran que la inversión es factible económicamente y constituye un objetivo social y de protección del medio ambiente, con un interés del gobierno y el CITMA.
6. La posibilidad real de remplazar parcial o totalmente a la leña como alternativa energética, por la multitubularidad provocada, puede producir un notable impacto medio ambiental, aún en las condiciones actuales de las tecnologías de combustión ineficientes, el impacto será más notorio si se generaliza el uso de tecnologías de combustión eficientes.

CONCLUSIONES.

1. Las respuestas favorables de la combustión de diferentes combustibles sólidos, en los experimentos realizados, reafirma el criterio de la multitubularidad como una condición indispensable para la gasificación de los combustibles sólidos.
2. Utilizando la multitubularidad como principio básico se desarrolló una metodología para diseñar fogones gasificadores de combustibles sólidos, que puede ser generalizada su aplicación a cualquier tipo de tecnología de combustión - gasificación.
3. El modelo físico matemático de la pérdida de masa en el tiempo es esencial para determinar la masa de gases combustibles que se generan en un determinado combustible sólido, en función de su multitubularidad.
4. La elevada eficiencia en el sistema de combustión, el gasto mínimo de combustible y la combustión completa de los mismos, es la demostración efectiva de la gasificación, empleando la Multitubularidad provocada.
5. La posibilidad de uso de cualquier biomasa o combustible sólido, es la principal ventaja de la Multitubularidad provocada como tecnología eficiente de combustión – gasificación.
6. Su bajo costo e impacto ambiental permiten asegurar que es una tecnología revolucionaria con un futuro asegurado.

RECOMENDACIONES.

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

BIBLIOGRAFÍA.

- Alvarez Godoy, Esther. (1999). *Perspectivas de aprovechamiento del aserrín mediante su transformación hidrolítica y como fuente de Biomasa para diversos fines*. Tesis Doctoral, Universidad de Pinar de Río.
- Añón, O. (1996). *Diseño, construcción y evaluación de dispositivos para determinar la influencia de la presión y la temperatura en las briquetas de paja de caña*. Tesis de grado, Universidad de Cienfuegos.
- Arrechea, J. (1996a). *Diseño, construcción y evaluación de dispositivos para la determinación de la presión transversal en la compactación de la paja de caña*. Tesis de grado, Universidad de Cienfuegos.
- Barriando, E. (2000). *Dispositivo para producir briquetas cilíndricas tubulares de paja de caña de diferentes dimensiones*. Tesis de grado, Universidad de Cienfuegos.
- Bhattacharya, SC, & DO Albina. (2002). Effects of selected parameters on performance and emission of biomass-fired cookstoves. *Biomass & Bioenergy*.
- Borroto Nordelo, Aníbal. (2007). *Combustión y Generación de Vapor*. *Universo Sur*, Universidad de Cienfuegos.
- Bugrov, Y. (1985). *Matemáticas superiores*. Moscú: MIR.
- Cervený, Michael. (n.d.). Impact of different National biomass policies on investment costs of biomass district heating plants. Retrieved from <http://www.eva.ac.at>.
- Collective authors. (2005). *Technology Packages: Solar, Biomass and Hybrid*, Retrieved from <http://www.serd.ait.ac.th/eric/>.
- Demirbas, A. (2004). Combustion characteristics of different biomass fuels. *Progress Energy Combust*, 30, 219–230.
- Demirbas, A. (2007). Combustion of Biomass. *Energy Sources*, 29, 549–561.
- Demirbas, A. (2002). Fuel characteristics of olive husk and walnut, hazelnut, sunflower and almond shells. *Energy Sources*, 24, 213–219.
- Demirbas, A. (2009). Recent advances in biomass conversion technologies. *Energy Edu. Sci. Technol*, 6, 19–40.

- Di Blasi, C., C. Branca, & A. Santoro. (2010). Pyrolytic behavior and products of some wood varieties. *Combustion and Flame*, 10.
- El Saeidy, M.Sc. Ehab. (2004). *Technological Fundamentals of Briquetting Cotton Stalks as a Biofuel*. zur Erlangung des akademischen Grades, Universität zu Berlin.
- Fernández Conde, E. (1994). *Termodinámica Técnica*. La Habana: Félix Varela.
- Fundora Acea, Irving. (2009). *Influencia de la Geometría de las briquetas tubulares y multitubulares en los índices fundamentales de combustión*. Tesis 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 al título de Doctor en Ciencias, Universidad de Cienfuegos.
- Hart, S., J. Ward, & M. Biffin. (2001). Development of a method to assess the reactivity of multi-component solid fuel briquettes. *Combustion Journal*, no. 200106.
- Infante, Cesar. (2010). *Evaluación térmica de prototipo de estufas eficientes para diferentes Biomásas*. Tesis de grado, Universidad de Cienfuegos.
- Kariuki Nyahoro, Peter. (2006). *Effects of Air Distribution on Pollutant Emission and Flame Characteristics of Open Buoyant Wood Combustion*. Requirements for the degree of Doctor, Graduate Faculty of North Carolina State University.
- Kudriavtsev, L.D. (1983a). *Curso de análisis matemático*. Moscú: MIR.
- Kudriavtsev, L.D. (1983b). *Curso de análisis matemático*. Moscú: MIR.
- Lari, K, & S. A. Gan Djalikhan Nassab. (2007, July 21). Transient Thermal characteristics of radiant burners. *Iranian Journal of Science & Technology*, Vol. 31, No. B4, pp 407-420.
- López-Ocaña, G, & RG Bautista-Margulis. (2008, May 5). Combustión de residuos sólidos municipales en un sistema de lecho fluidizado experimental. Retrieved from www.ujat.mx/publicaciones/uciencia.

- Meneses Subarnaba. (2008). *Evaluación del prototipo de fogones para el uso eficiente de las biomásas destinadas a la cocción de alimentos*. Tesis de maestría, Universidad de Cienfuegos.
- Meneses, Y. (2008). *Evaluación de prototipo de Estufa para biomásas*. Trabajo de Diploma, Universidad de Cienfuegos.
- Ortiz, Luis. (1994). Energías xilogeneradas.. Retrieved from www.forestales.uvigo.es/enerxiasrenovabeis.pdf.
- Pérez Egusquiza, F., & Ángel Rubio. (1994). Disponibilidad de residuos agrícolas cañeros como combustibles en Cuba. *Centro azúcar*, 21, 49-54.
- PCC. (2010). *Proyecto de lineamientos de la política Económica y Social*.
- Saptoadi, Harwin. (2006). *The Best Biobriquette Dimension and its Particle Size*. Bangkok, Thailand, 4, 109-216.
- Schneider, Herbert E. (2008). *Desarrollo de una nueva cocina mejorada para leña basada en el principio de gasificación de flujo cruzado natural*. Tesis de grado, Antiguo Cuscatlán, El Salvador.
- Turrini, Enrico. (2006). *El camino del Sol*. La Habana: CUBASOLAR. 366 p.
- Van Den Berg, Jan Bouwe, & Vincent Guyonne. (2006, November 14). Flame balls for a free boundary combustion model with radiative transfer. *Society for Industrial and Applied Mathematics*, 67, no. 1, 116-137.
- Verdecia Torres, David, & Raul Pacheco Gamboa. (2005). Determinación del tiempo de combustión para las briquetas cilíndricas macizas de paja de cana.. *Revista ciencias técnicas agropecuarias*, 14, no. 004, 56-59.
- Zamora González, Luis. (2003). *Horno de Capa Cónica Deslizante (HCCD) para quemar cáscara de café y otras biomásas*. Tesis de maestría, Universidad de Cienfuegos.

ANEXO No.1.



Fig. 1.1.- Biociclo de la Biomasa.

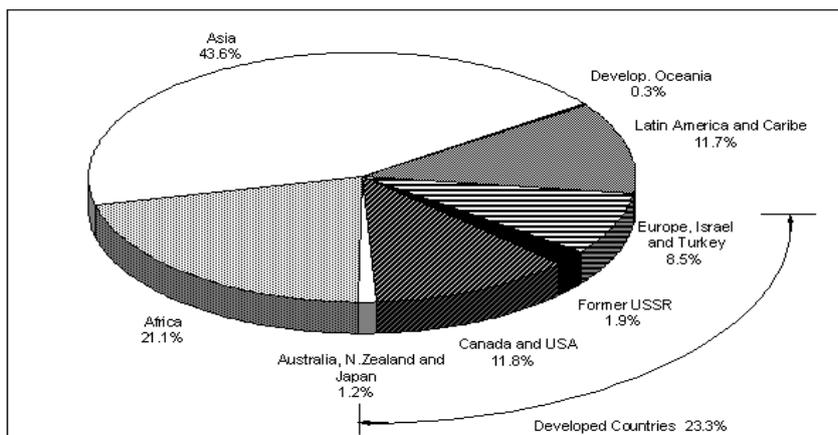


Tabla 1.1.- Utilización de la biomasa como fuente de energía en el mundo.

ANEXO No.2.

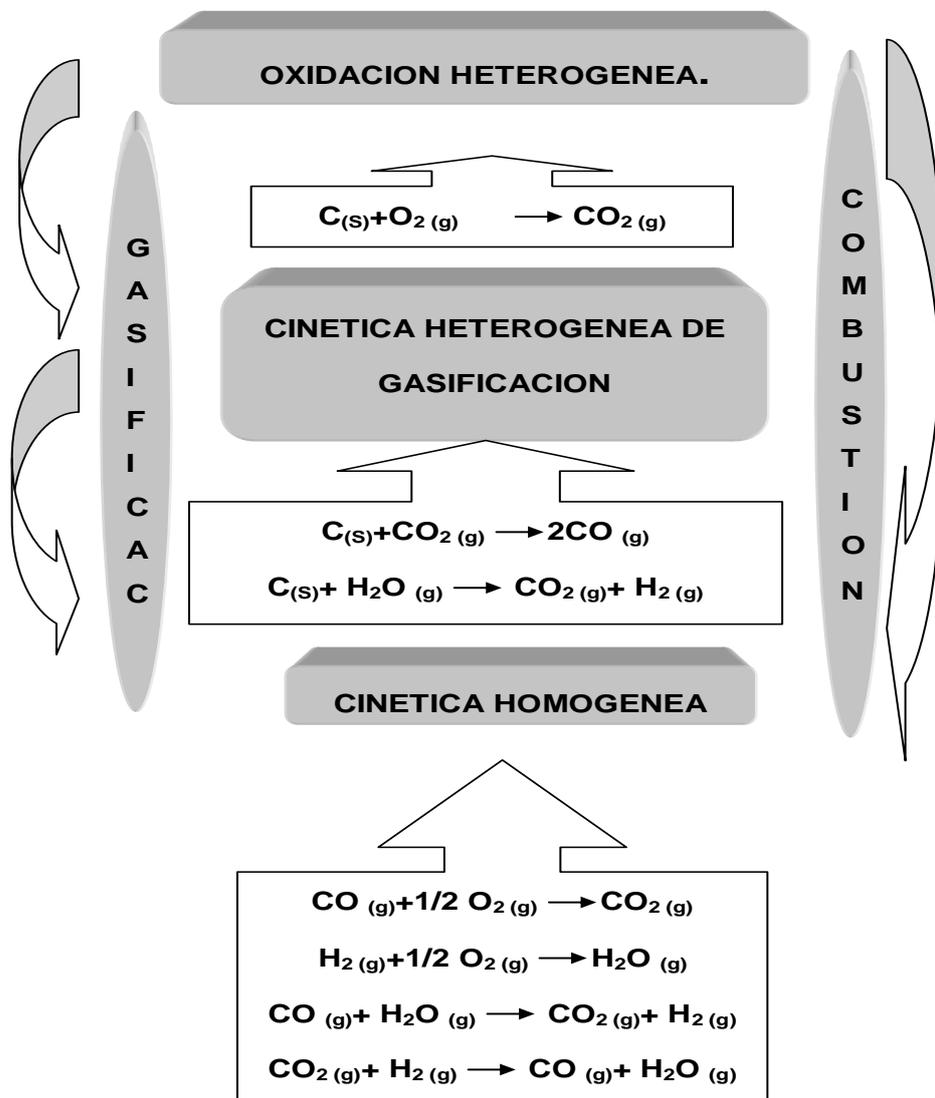


Fig. 1.6.- Gráfico del orden de ocurrencia de las reacciones en el proceso de combustión y gasificación de biomasa.

ANEXO No.3.

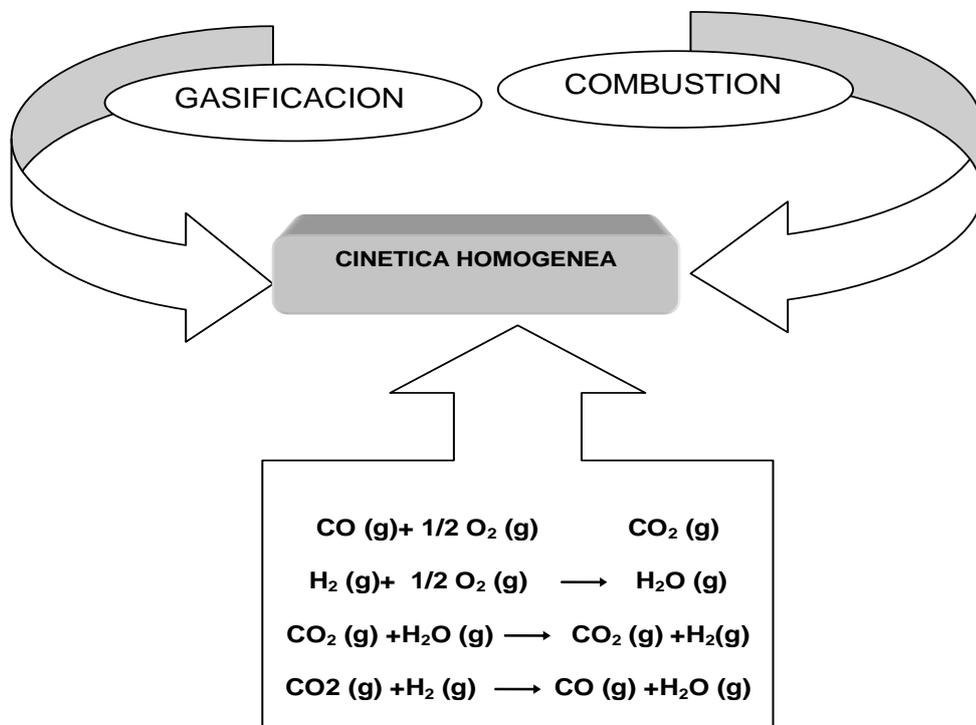


Figura 1.7.- Reacciones homogéneas

ANEXO No.4.

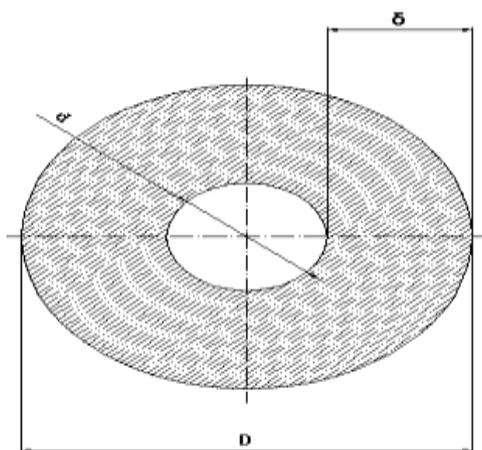


Fig. 1.8.- Briqueta cilíndrica tubular.

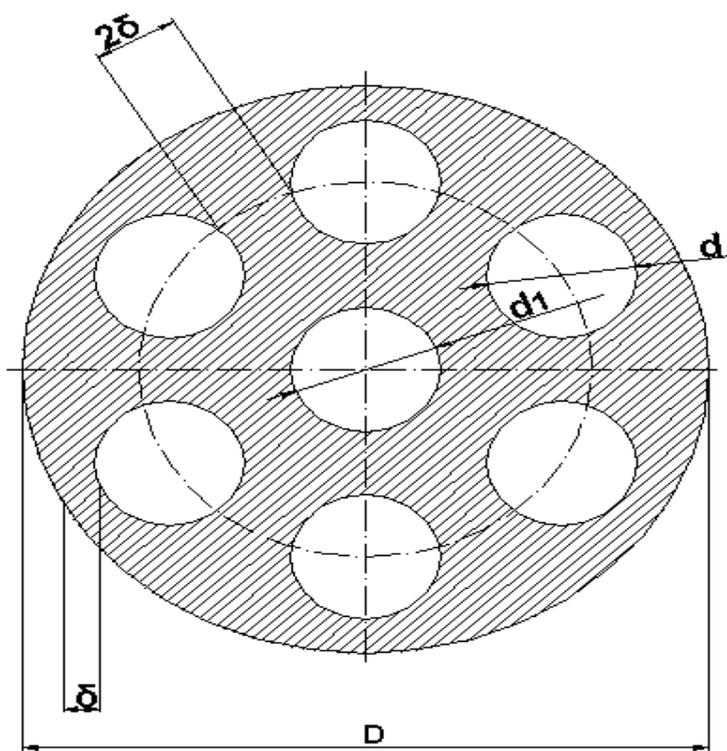


Fig. 1.9.- Briqueta cilíndrica multitubular de biomasa.

ANEXO No.5.

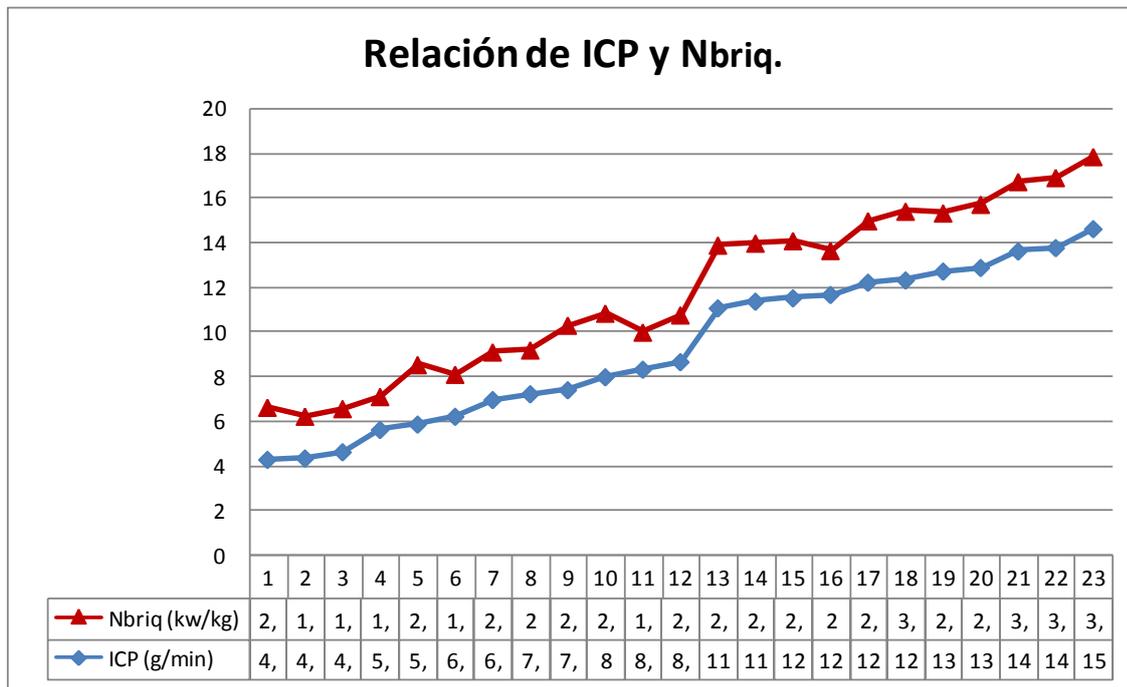


Fig. 1.10.- Relación del comportamiento del ICP y N_{briq} en función de las distintas briquetas analizadas

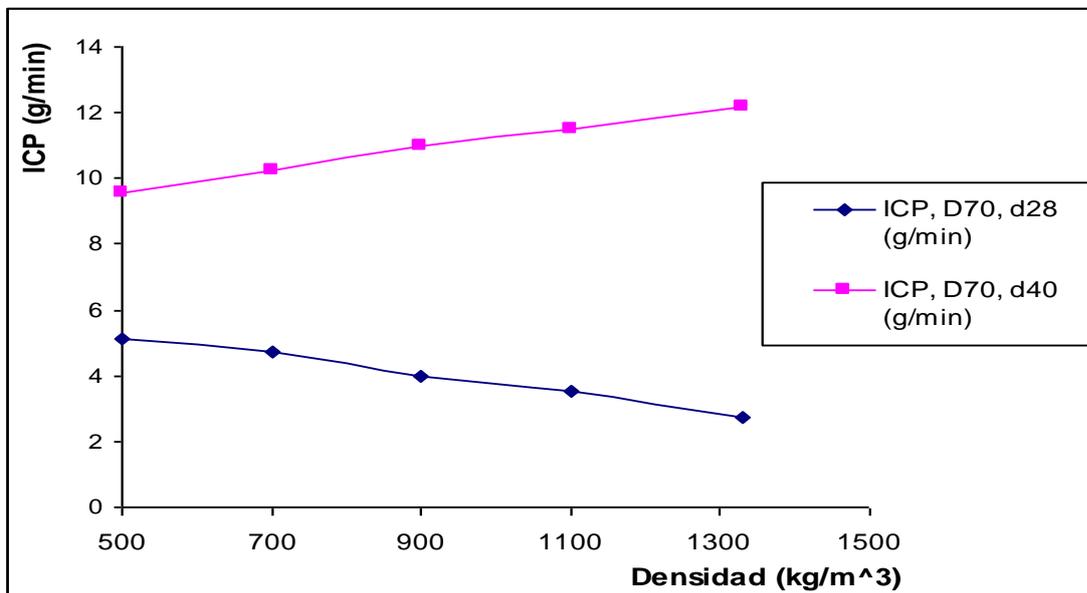


Fig. 1.4.- Comportamiento del ICP para diferentes diámetros (d) del conducto de las briquetas.

ANEXO No.6.

DIEZ PRINCIPIOS DE DISEÑO.

PRINCIPIO UNO:

En la medida de lo posible, es necesario aislar alrededor del fuego con materiales livianos y resistentes al calor.

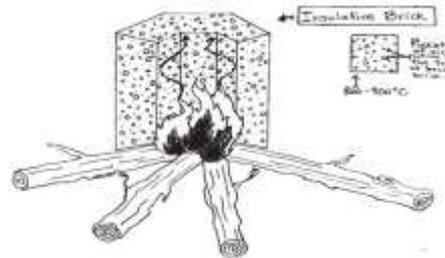


Fig. 2.1 Aislante

PRINCIPIO DOS:

Instalar una chimenea corta y aislada directamente encima del fuego.

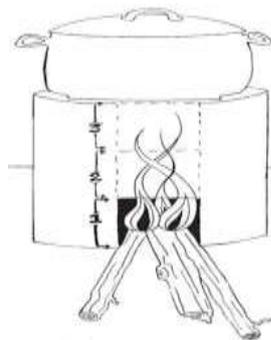


Fig. 2.2 Chimenea corta encima del fuego.

PRINCIPIO TRES:

Calentar y quemar las puntas de los palos a medida que se meten al fuego.

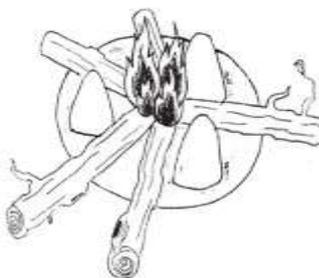


Fig. 2.3 Combustión más limpia.

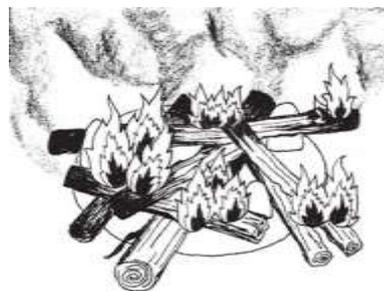


Fig. 2.4 Madera incandescente que hace humo.

PRINCIPIO CUATRO:

Crear temperaturas altas y bajas según la cantidad de leña que se mete al fuego.

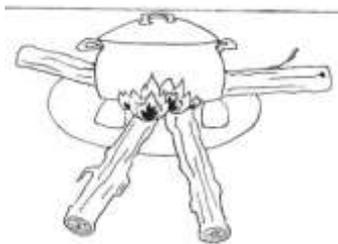


Fig. 2.5 Fuego lento

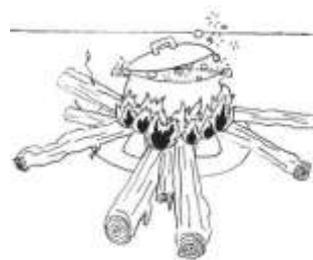


Fig. 2.6 Fuego alto

PRINCIPIO CINCO:

Mantener una corriente de aire buena y rápida en todo el carburante.

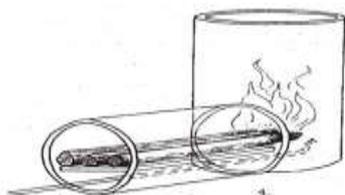


Fig. 2.7 Mantener una buena corriente de aire

PRINCIPIO SEIS:

La falta de corriente de aire en el fuego resulta en humo y exceso de carbón.

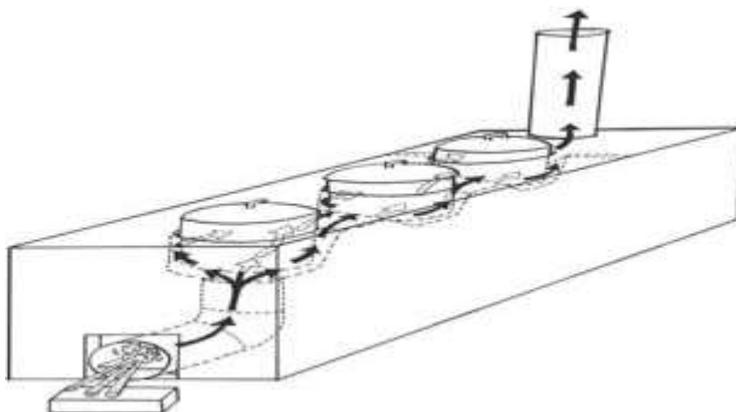


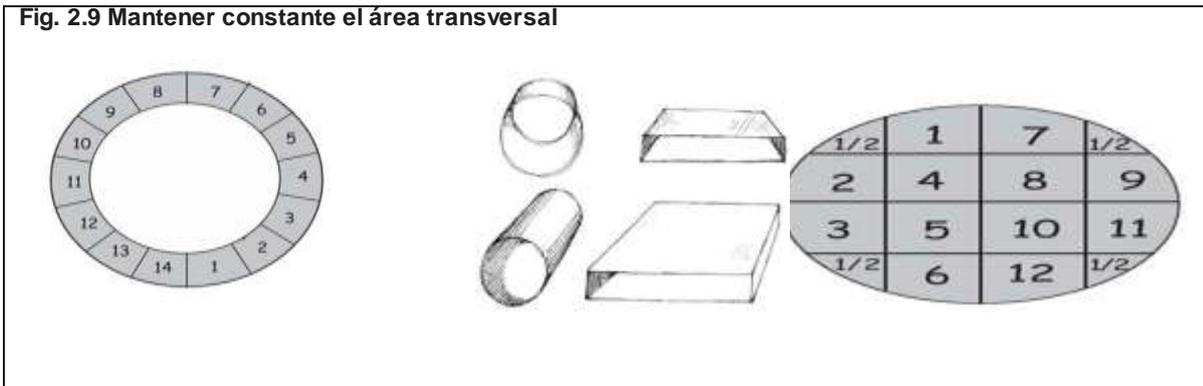
Fig. 2.8 Equilibrar la corriente de aire en una estufa de varias ollas.

PRINCIPIO SIETE:

La abertura al fuego, el tamaño de los espacios dentro de la estufa por donde pasan los gases calientes y la chimenea externa deben ser aproximadamente del mismo tamaño.

Esto es mantener una superficie transversal consistente y ayuda a mantener una corriente pareja en la estufa. Una buena corriente no sólo mantiene el calor del fuego, sino que también es esencial para que el aire caliente creado por el fuego pueda transferir efectivamente su calor a la olla.

Fig. 2.9 Mantener constante el área transversal



PRINCIPIO OCHO:

Usar una reja debajo del fuego.

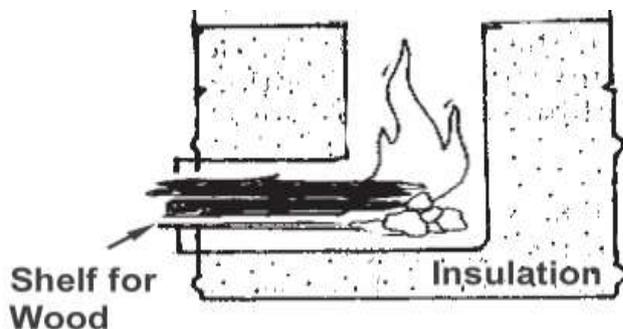


Fig. 2.10 Uso de rejilla debajo del fuego.

PRINCIPIO NUEVE:

Aislar la trayectoria del aire caliente.

PRINCIPIO DIEZ:

Aumentar el intercambio térmico de la olla con espacios adecuados.

Los dos factores más importantes para aumentar el calor que pasa a una olla o plancha son:

- 1) Mantener la más alta temperatura posible de los gases de combustión que tocan la olla o la plancha.
- 2) Forzar los gases calientes a rozar la superficie con rapidez y no lentamente.

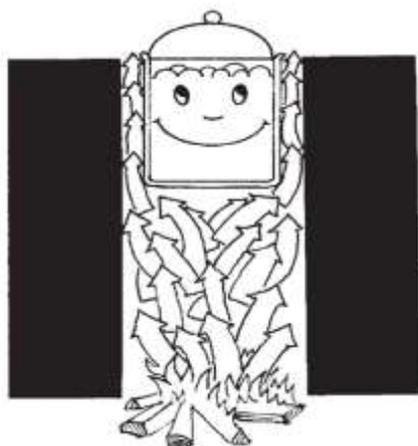


Fig. 2.11 Un canal de tamaño apropiado optimiza intercambio térmico con la olla.

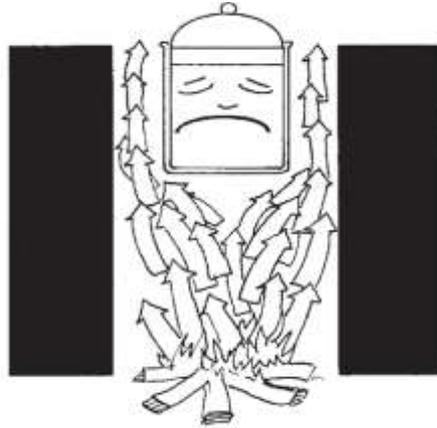


Fig.2.12 Un intercambio

canal demasiado ancho reducirá el térmico con la olla

ANEXO No.7.

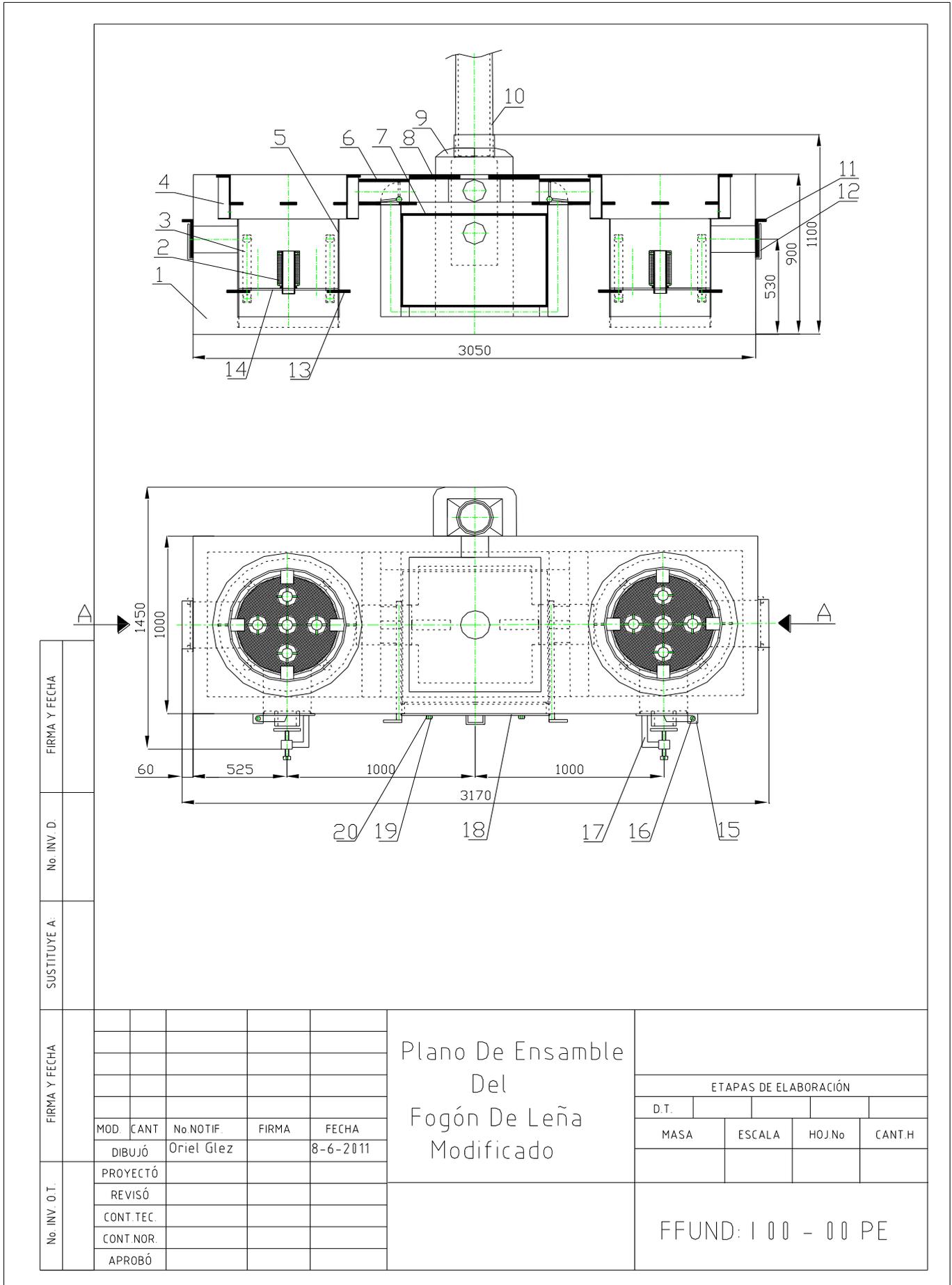
Tabla 2.2. Valores la energía disponible, la potencia disponible, la temperatura media en la hornilla.

No	Var	d _g (mm)	n _g	F _t (m ³ /s)	β %	T _h °C	E _{disp} (kW-h)	N _{disp} (kW)	η _{sc} %
1	AHJN			0,0035	30	520	7,45	2,97	42
2	AHJO			0,00175	20	425	5,26	1,75	24
3	BHJN			0,0035	45	550	7,45	3,72	43
4	BHJO			0,00175	45	470	6,44	1,84	40
5	CHJN	130	1	0,0035	45	535	7,44	3,23	43
6	CHJO	130	1	0,00175	45	475	6,45	1,74	40
7	DHJN	60	3	0,0035	45	570	7,45	3,54	44
8	DHJO	60	3	0,00175	45	468	6,44	1,84	40
9	EHJN	60	3	0,0035	55	560	7,45	3,23	44
10	EHJO	60	3	0,00175	55	460	6,45	1,78	41
11	FHJN	40	4	0,0035	47	580	7,45	3,72	45
12	FHJO	40	4	0,00175	47	467	6,44	1,95	41
13	GHJN	40	4	0,0035	54	580	7,44	3,54	44
14	GHJO	40	4	0,00175	54	470	6,45	1,89	42
15	AHKN			0,0035	52	560	7,44	2,83	51
16	AHKO			0,00175	48	470	6,44	1,74	49
17	BHKN			0,0035	48	580	7,44	3,54	54
18	BHKO			0,00175	54	510	7,44	2,02	50

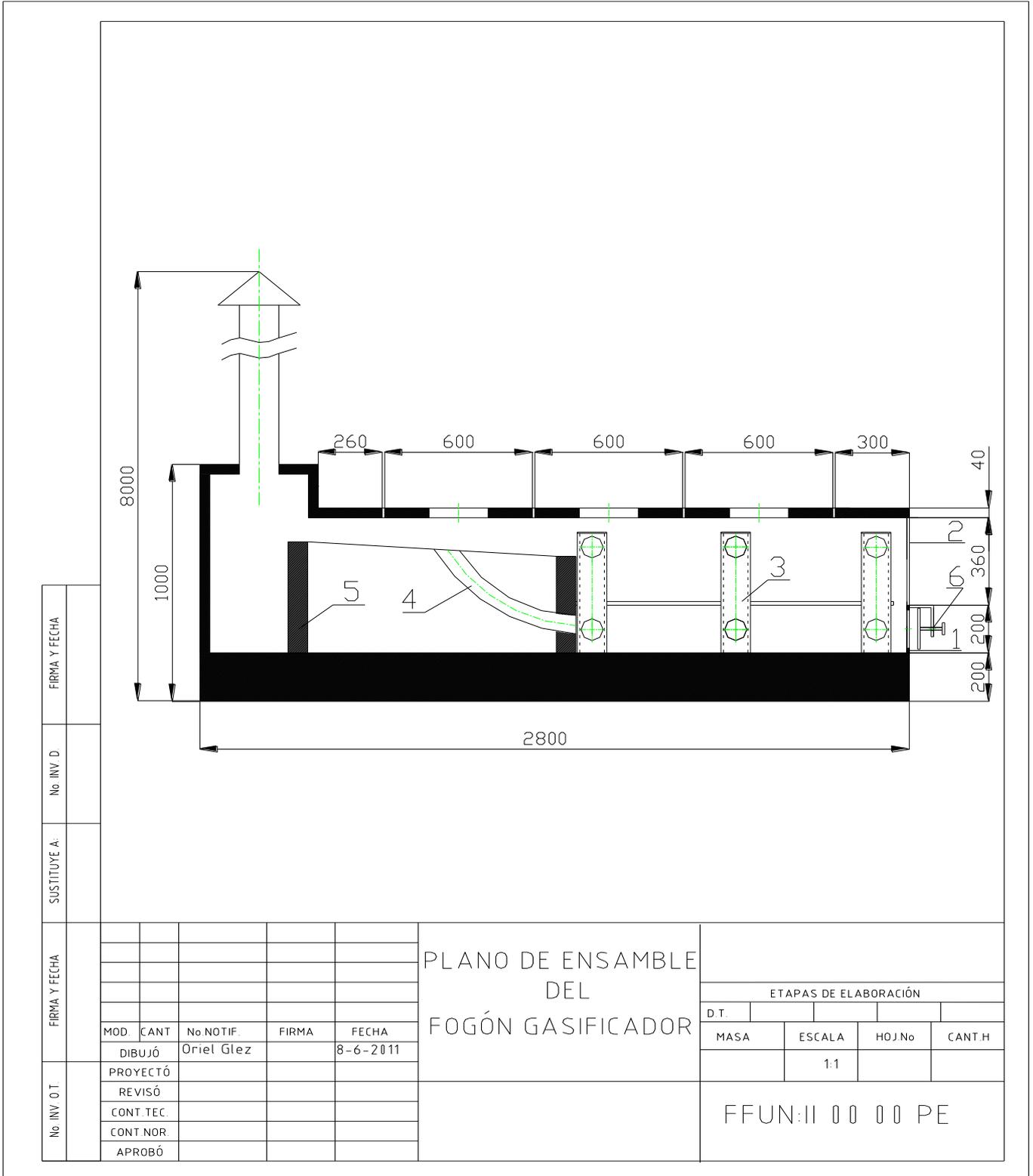
Tabla 2.2.- Continuación

19	CHLN	130	1	0.0035	17	270	3.45	0,76	12
20	CHLO	130	1	0.00175	17	375	3.45	0,86	22
21	CHMN	130	1	0.0035	17	275	3.45	0,86	12
22	CHMO	130	1	0.00175	17	385	3.45	0,81	22
23	DHLN	60	3	0.0035	18	270	3.45	0.81	13
24	DHLO	60	3	0.00175	18	280	3.45	1.78	14
25	EHLN	60	3	0.0035	48	470	6.45	1.61	32
26	EHLO	60	3	0.00175	48	470	6.45	1.95	40
27	DHMN	60	3	0.0035	18	280	3.45	0.98	32
28	DHMO	60	3	0.00175	18	410	6.45	2.15	30
29	EHMN	60	3	0.0035	48	394	3.45	1.28	43
30	EHMO	60	3	0.00175	48	480	6.45	1.90	43
31	FHLN	40	4	0.0035	30	580	7.45	2.97	42
32	FHLO	40	4	0.00175	30	478	6.45	1.84	42
33	GHLN	40	4	0.0035	61	590	7.45	3.23	55
34	GHLO	40	4	0.00175	61	510	7.45	2.48	52
35	FHMN	40	4	0.0035	30	570	7.45	2.97	54
36	FHMO	40	4	0.00175	30	490	7.45	2.12	49
37	GHMN	40	4	0.0035	61	580	7.45	2.97	55
38	GHMO	40	4	0.00175	61	520	7.45	2.48	52

ANEXO No.8



ANEXO No. 9



FIRMA Y FECHA	
No. INV. D.	
SUSTITUYE A	
FIRMA Y FECHA	
No. INV. O.T.	

MOD.	CANT	No NOTIF.	FIRMA	FECHA
		Oriel Glez		8-6-2011

PLANO DE ENSAMBLE
DEL
FOGÓN GASIFICADOR

ETAPAS DE ELABORACIÓN			
D.T.			
MASA	ESCALA	HOJ.No	CANT.H
	1:1		
FFUN:II 00 00 PE			

ANEXO No.10

CONCEPTO	MN	CUC	Total
Costo del Suministrador	2610		2610
Consumo Material	1.2	1.2	2.5
Portadores Energéticos	13.3	7.0	20.2
Mtto. y Reparaciones	1.8	1.8	3.6
Servicios de Producción	1.3	1.3	2.6
Otros Gastos	17.0	0.9	17.8
Costo Total (MP)	2644.5	12.2	2.7

ANEXO No. 11Título del Proyecto: **Estudio de Factibilidad Fogón. EMA**
Cumanayagua**ESTADO DE INGRESOS NETOS**

Todos los valores en: MP

Período	<u>Año 1</u>	<u>Año 2</u>
1.TOTAL DE INGRESOS	13.319,9	26.639,7
2.COSTOS DIRECTOS	99,5	199,0
Insumos ó Merc.p/Venta(Mat.Primas y Materiales)	6,1	12,2
Salarios Directos (incl.Imp.Util.Fza.Trab.y Seg.Social)	43,7	87,5
Servicios Públicos (Electr,agua,etc)	49,6	99,3
3.COSTOS INDIRECTOS	6.417,5	12.835,0
Gastos Comerciales (Distrib.y Ventas)	6,3	12,6
Gastos de Mantenim.	8,8	17,7
Otros Gastos	6.402,4	12.804,7
4.COSTOS DE OPERACION (2+3)	6.517,0	13.034,0
5.DEPREC. y AMORTIZACION		
6.GASTOS FINANCIEROS (Intereses y Serv.Banc.)		
8.COSTOS TOTALES (4+5+6+7)	6.517,0	13.034,0
9.UTILIDADES BRUTAS (1-8)	6.802,9	13.605,8
10.RESERVA p/CONTING.	340,1	680,3
11.UTILID. IMPONIBLES (9-10)	6.462,7	12.925,5
12.IMPUESTOS S/UTILID.	2.262,0	4.523,9
13.UTILIDADES NETAS (11-12)	4.200,8	8.401,6
14.FONDO DE ESTIMULAC.	0,0	0,0
15.DIVIDENDOS (13-14)	4.200,8	8.401,6
16.UTILID. NO DISTRIB.	4.200,8	8.401,6
17.UTIL.NO DISTR.ACUM.	4.200,8	
AÑOS	<u>1</u>	<u>2</u>
- Costo Total/Ingr.	0,49	0,49

ANEXO No. 13

1. 12

FLUJO DE CAJA PARA LA PLANIFICACION FINANCIERA -

Titulo: Estudio de Factibilidad : EMA Cumanayagua.

Localización:	Cienfuegos.	Inv.Total:	614,7	Fecha:	29/6/11
Organismo:	MINAGRI	Inv.en Div:		Año Base:	2008
Preparado por:	ENPA	Tasa Act (%):		UM:	MP

<u>CONCEPTO</u>	<u>TOTALES</u>	<u>Año 1</u>	<u>Año 2</u>	<u>Año 3</u>	<u>Año 4</u>
<u>A. ENTRADAS DE EFECTIVOS</u>	133.323,7	13.444,9	26.639,7	39.959,6	53.279,9
- Recursos financieros	125,0	125,0	0,0	0,0	0,0
..Capital Social (Aportes)	125,0	125,0	0,0	0,0	0,0
..Préstamos	0,0				
- Ingresos	133.198,7	13.319,9	26.639,7	39.959,6	53.279,9
<u>B.SALIDAS DE EFECTIVOS</u>	65.784,6	8.323,6	14.225,9	20.742,9	27.259,9
- Inversión Total	5.382,3	1.806,6	1.191,9	1.191,9	1.191,9
.. Capital Fijo	614,7	614,7			
.. Incr.Capital de Trabajo	4.767,6	1.191,9	1.191,9	1.191,9	1.191,9
- Costos de Operación	65.169,9	6.517,0	13.034,0	19.551,0	26.068,9
- Impuestos	0,0				
- Dividendos	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
- Servicio de la Deuda	0,0		0,0	0,0	0,0
.. Intereses	0,0		0,0	0,0	0,0
.. Reembolso del Principal	0,0				
- Fondo Estimul. y Desarrollo	0,0	0,0			
- Servicios Bancarios	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
<u>C.SALDO ANUAL (A-B)</u>	67.539,1	5.121,3	12.413,9	19.216,7	26.019,9
<u>D.SALDO ACUMULADO</u>	5.121,3	5.121,3	0,0	0,0	0,0
4. INCREMENTO / DECREMENTO DEL CAPITAL DE TRABAJO			1.191,9	1.191,9	1.191,9

Título: Estudio de Factibilidad. EMA Cumanayagua

Localización: Cienfuegos.
Organismo: MINAGRI
Preparado por: ENPA
Inv.Total: 614,7
Fecha: 29/6/11
Año Base: 2008
UM: MP

<u>CONCEPTO</u>	<u>TOTALES</u>	<u>Año 1</u>	<u>Año 2</u>	<u>Año 3</u>	<u>Año 4</u>
<u>A.ENTRADA DE EFECTIVOS</u>	133.198,7	13.319,9	26.639,7	39.959,6	53.279,9
- Ingresos por Ventas	133.198,7	13.319,9	26.639,7	39.959,6	53.279,9
<u>B.SALIDA DE EFECTIVOS</u>	70.552,2	8.323,6	14.225,9	20.742,9	27.259,8
- Inversión Total	5.382,3	1.806,6	1.191,9	1.191,9	1.191,9
.. Capital Fijo	614,7	614,7	0,0	0,0	0,0
.. Incr.Capital de Trabajo	4.767,6	1.191,9	1.191,9	1.191,9	1.191,9
- Costos de Operación	65.169,9	6.517,0	13.034,0	19.551,0	26.068,3
<u>C.SALDO ANUAL (A-B)</u>	67.414,1	4.996,3	12.413,9	19.216,7	26.019,1
<u>D.SALDO ACUMULADO</u>	4.996,3	4.996,3	0,0	0,0	0,0

INDICADORES ECONOMICOS

		Período de		
TIR:	No Tiene	Recuperación:	0,00	Años
	MP			Costo Inv. Act. en
VAN:	62.646,5	RVAN:	11,64	5.382,3
VAN:	60.772,0	RVAN:	11,44	5.312,0
VAN:	58.976,6	RVAN:	11,25	5.243,9
VAN:	57.256,1	RVAN:	11,06	5.178,0
VAN:	55.606,7	RVAN:	10,87	5.114,2