Trabajo de Diploma

Título:

Metodología para el diseño de fogones gasificadores de biomasas, utilizando el principio de multitubularidad en el combustible.

Diplomante:

Oriel González Dávila

Tutor:

Dr. Pedro Fundora Beltrán

"Año 53 de la Revolución"

Curso 2010-2011

DECLARACION DE AUTORIDAD

UNIVERSIDAD DE CIENFUEGOS

"Carlos Rafael Rodríguez"

Sistema de Documentación y Proyecto.

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

_____

Firma del autor.

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

_____

Información Científico Técnico

Nombre y Apellidos. Firma.

_____ _____

Vice Decano. Firma del Tutor

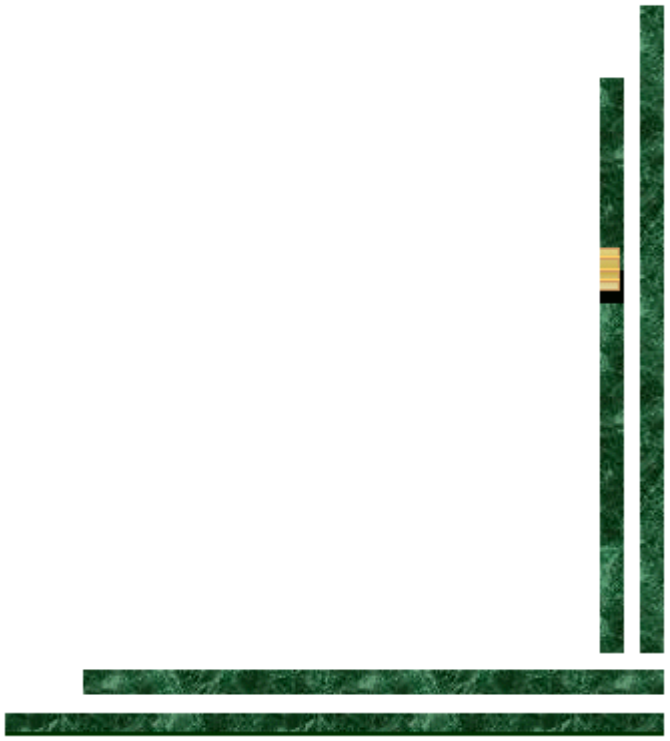
Nombre y Apellidos. Firma. Nombre y Apellidos. Firma.

_____

Sistema de Documentación y Proyecto.

Nombre y Apellidos. Firma

PENSAMIENTO



"Un ser sin estudio es un ser incompleto"

Simón Bolívar

DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado a todas las personas que en mi vida me han motivado a luchar por alcanzar todos mis sueños, especialmente:

A mi hijo Carlos Daniel y a mi sobrina Lizmarian de la Caridad, por darme fuerzas para seguir adelante, con su alegría y cariño, por ser mi razón de ser.

A la memoria de mis queridísimos abuelos, Agusta y José Joaquín.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mis padres Raúl y Zoila, por el apoyo, el cariño y el amor incondicional con que me alentaron para ser un graduado universitario.

A mi hermana Yamisleidy, por ser un ejemplo a seguir con su estudio y dedicación a su profesión.

A mi tía Petra que aunque lejos siempre he podido contar con ella para todo.

A mi mujer Anaily y su familia, por su apoyo y comprensión.

A mi tutor Dr. Pedro Fundora Beltrán, por su orientación y guía.

A mis profesores durante toda la carrera, por formarme como un profesional y llenarme de conocimientos.

A mis compañeros y amigos de aula, por estar conmigo en los momentos buenos y malos.

A todas aquellas personas que de una forma u otra han hecho posible la culminación de mi carrera.

A toda mi familia, muchas gracias: "Oriel."

RESUMEN

Resumen

En el presente trabajo se hace un estudio del sistema térmico del fogón de leña de la Empresa Agroindustrial de Cumanayagua (EMA). Se valoró su eficiencia y consumo de combustible, para de esta forma tener criterios generalizados de esta problemática en La Empresa. La caracterización de esta tecnología permitió proponer alternativas de solución que posibilitaron reducir los consumos de combustible, con mínimas transformaciones, dirigidas fundamentalmente a la cámara de combustión, a la organización del combustible y del proceso de cocción de los alimentos.

La evaluación precedente junto con otros trabajos de investigación realizados con anterioridad, permitieron plantear una metodología para el diseño de nuevos tipos de fogones con un principio básico de la naturaleza “Principio de La Multitubularidad en el combustibles sólidos para la gasificación-combustión”, se parte del modelo físico matemático de comportamiento de la pérdida de masa en el tiempo, de las briquetas tubulares y multitubulares en combustión, fuera de una cámara con registro de la masa por unidad de tiempo.

Se obtiene un modelo exponencial de la forma $w_t = b_0 + b_1 \cdot e^{-c_1 \cdot t}$ que al ser linealizado permite determinar las constantes b_0, b_1 y c_1 y su derivación respecto al tiempo representa el índice instantáneo de combustión o velocidad de pérdida de masa. La sumatoria de estas magnitudes en cada intervalo de tiempo representa la pérdida total de masa del combustible sólido, o la transformación de este en gases combustibles (Gasificación) al relacionar esta magnitud con la masa inicial del combustible se obtuvo el índice de gasificación (Ψ), que puede ser utilizado en el pronóstico de una masa cualquiera de combustible sólido en la cámara de combustión, siempre que satisfaga el principio de la multitubularidad.

En el trabajo se exponen las relaciones dimensiónales que aseguran el proceso de gasificación y la eficiencia de la combustión de los gases combustibles, generados además de la opción de elegir dimensiones y número de gasificadores que aseguren la multitubularidad requerida, fundamentalmente cuando se opera con combustibles de pequeña granulometría, en su estado natural.

Se ejecuta el diseño de un fogón gasificador, utilizando la metodología propuesta y se plantea una valoración del costo de fabricación del mismo y el impacto ambiental que ello representa.

ÍNDICE

Índice

INTRODUCCIÓN ..... **I**

CAPÍTULO I: FUNDAMENTO DEL PROCESO DE COMBUSTIÓN Y GASIFICACIÓN DE LOS COMBUSTIBLES SÓLIDOS **1**

1.1 - RESEÑA HISTÓRICA DE LOS COMBUSTIBLES SÓLIDOS. 1

1.2 - VARIANTES DE DISEÑO DE ESTUFAS Y SUS CARACTERÍSTICAS. 2

1.2.1 - Estufa Navivoti Chulha. 2

1.2.2 - Estufa mejorada para la calefacción y cocción de alimentos, de procedencia Paquistaní... 3

1.2.3 - Estufa Institucional USIKA. 3

1.2.4 - Estufa Justa. 4

1.3 - PROCESO DE COMBUSTIÓN DE LOS COMBUSTIBLES SÓLIDOS. 5

1.4 - BIOMASA. 7

1.4.1 - Clasificación de los recursos de bioenergía. 8

1.5 - GASIFICACIÓN. 10

1.5.1 - Introducción. 10

1.5.2 - Aplicaciones comunes. 11

1.5.3 - Gasificación. 13

1.5.4 - Diferencia entre gasificación y combustión. 13

1.5.5 - Gasificador. 14

1.5.6 - Proceso de gasificación. 14

1.5.7 - Termoquímica del proceso de gasificación. 14

1.5.8 - Tipos de gasificadores. 17

1.5.9 - Ventajas y desventajas según el tipo de gasificación. 18

1.6 - COMBUSTIÓN. 19

1.7 - FOGONES EFICIENTES. 20

1.7.1 - Fogón de leña modelo '' Doña Justa''. 20

1.7.2 - Fogón para leña J.P.V.C. 21

1.7.3 - Fogón recuperativo para biomasas P.F.B.A. 22

1.7.4 - Principio de funcionamiento del Fogón- Gasificador. 22

CAPÍTULO II: EVALUACIÓN Y DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA TÉRMICA DEL FOGÓN DE LEÑA DE LA EMPRESA AGROINDUSTRIAL DE CUMANAYAGUA (EMA)..... 26

2.1 - METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN PARA DETERMINAR LA EFICIENCIA DEL SISTEMA TÉRMICO DEL FOGÓN DE LEÑA DE LA EMA...... 26

2.1.1 - Caracterización de la tecnología de combustión. 26

2.1.2 - Caracterización de las diferentes partes componentes del fogón. 28

2.2 - CARACTERIZACIÓN DEL COMBUSTIBLE. 29

2.2.1 - Tipo de combustible que utiliza. 29

2.2.2 - Dimensión promedio de los elementos combustibles. 29

2.2.3 - Humedad del combustible. 29

2.2.4 - Densidad del combustible. 29

2.2.5 - Tiempo de ignición del combustible. 30

2.2.6 - Cantidad de combustible (Diesel) que se utiliza hasta lograr la ignición de la leña. 30

2.2.7 - Funcionamiento del fogón. 30

2.3 - CARACTERIZACIÓN DE LAS OLLAS QUE SE UTILIZAN PARA LA ELABORACIÓN DE ALIMENTOS. 31

2.3.1 - Dimensiones y capacidad de las ollas que se utilizan para la cocción de alimentos. 31

2.4 - EVALUACIÓN DEL SISTEMA TÉRMICO. 32

2.4.1 - Tiempo de comienzo de ebullición del agua en las distintas ollas y en cada hornilla, para determinar cual hornilla aporta mayor calor. 32

2.4.2 - Tiempo promedio de duración de algunos alimentos hasta la cocción, con sus ollas correspondiente. 33

2.4.3 - Prueba de gasto de combustible promedio que se utiliza por día. 33

2.4.4 - Prueba de agua con una masa de agua determinada en una olla durante un tiempo determinado y con la masa de combustible equivalente a la hornilla. 34

2.5 - BALANCE DE ENERGÍA. 35

2.5.1 - Eficiencia del sistema térmico a partir de los resultados experimentales. 35

2.5.2 - Potencia efectiva específica del sistema térmico. 37

2.5.3 - Tiempo efectivo de aprovechamiento del fogón, (min). 37

2.5.4 - Masa de combustible necesaria para la cocción del alimento. 38

2.5.5 - Potencia necesaria del combustible. 38

2.5.6 - Energía disponible en la hornilla. 39

CAPÍTULO III: METODOLOGÍA DE DISEÑO DE FOGONES GASIFICADORES DE BIOMASAS, UTILIZANDO EL PRINCIPIO DE LA MACRO MULTITUBULARIDAD NATURAL O PROVOCADA, EN LA COMBUSTIÓN DE LECHO FIJO DE CAPA GRUESA. 42

3.1- INTRODUCCIÓN. 42

3.2- LA MULTITUBULARIDAD Y LA EFECTIVIDAD DE LA COMBUSTIÓN DE LOS COMBUSTIBLES SÓLIDOS. 43

3.3- DISEÑO DE EXPERIMENTOS PARA DETERMINAR LA INFLUENCIA DE LA TUBULARIDAD Y MULTITUBULARIDAD DE LAS BRIQUETAS DE DIFERENTES BIOMASAS, EN LOS ÍNDICES FUNDAMENTALES DE COMBUSTIÓN, QUE POSIBILITAN CARACTERIZAR LA CALIDAD TÉRMICA DE LAS MISMAS. 44

3.3.1 - Resultados del procesamiento estadístico de los diferentes factores independientes con los factores de respuestas. 46

3.3.2 - Análisis de los resultados. 46

3.4- ÍNDICE DE TRANSFORMACIÓN DE LAS BIOMASAS O GRADO DE TRANSFORMACIÓN DE LAS BIOMASAS EN BIOGÁS, DURANTE EL PROCESO DE GASIFICACIÓN. 48

3.4.1 Gasificación de las biomasas en la combustión en lecho fijo de capa gruesa con macro multitubularidad provocada. 48

3.4.2 Determinación del índice de transformación de las biomasas en el proceso de gasificación (ψ). 49

3.5- DIMENSIONADO PRELIMINAR DE UNA CÁMARA DE COMBUSTIÓN CON SUS DISPOSITIVOS DE GASIFICACIÓN-COMBUSTIÓN. 62

3.5.1 - Dimensionamiento de la Cámara de Combustión. 62

3.5.2 - Forma geométrica de la Cámara de Combustión. 62

3.5.3 - Metodología para el dimensionado de la cámara de combustión y dispositivos de gasificación. 65

3.6 - DISEÑO DEL FOGÓN GASIFICADOR. 66

3.6.1 - Principio de la macro multitubularidad. 66

3.6.2 - Ejemplo de cálculo. 67

3.7 - FACILIDADES DEL FOGÓN DISEÑADO. 74
3.8 - ESTRUCTURA Y FUNCIONAMIENTO DEL FOGÓN GASIFICADOR (FFUND: II 00 - 00 - PE). 75
3.9 - FUNCIONAMIENTO DEL FOGÓN GASIFICADOR (FFUND: II 00 – 00 – PE). 79

CAPÍTULO IV: COSTO DE FABRICACIÓN DEL FOGÓN GASIFICADOR..... 83

4.1 - GENERALIDADES DEL COSTO. 83
4.2 - COSTO DE MATERIALES. 84
4.2.1 - Para horno de 400 x 500 x 350 con superficie superior metálica de Acero, espesor 8mm y hornillas planas en las tres posiciones. 85
4.2.2 - Sin horno, con parrilla esquelética en las cámaras de combustión y hornillas planas en su parte central..... 86
4.2.3 - Costos de materiales auxiliares. 86
4.3 - GASTO EN SALARIO. 87
4.4 - GASTO GENERADO POR LA AMORTIZACIÓN DE LOS EQUIPOS. 88
4.5 - COSTO POR EL CONSUMO DE ENERGÍA ELÉCTRICA. 89
4.6 - TOTAL DE GASTOS DIRECTOS. 90
4.7 - TOTAL DE GASTOS INDIRECTOS. 90
4.8 - COSTO TOTAL DE FABRICACIÓN DEL FOGÓN. 90

CONCLUSIONES GENERALES..... 94

RECOMENDACIONES 96

BIBLIOGRAFÍA 98

INTRODUCCIÓN

Introducción

En el discurso pronunciado por el Presidente del Consejo de Estado y de Ministro de la República de Cuba en la XIII Conferencia de Jefes de Estado y de Gobierno del Movimiento de Países No Alineados, Malasia, 25 de febrero de 2003 planteó: “En sólo 150 años se habrán agotado el gas y el petróleo que el planeta tardó 300 millones de años en acumular. La humanidad en sólo 100 años creció de aproximadamente 1 500 millones a más de 6 000 millones de habitantes. Tendrá que depender por entero de fuentes de energía que aún están por investigar y desarrollar. La pobreza crece; viejas y nuevas enfermedades amenazan con aniquilar naciones enteras; la tierra se erosiona y pierde fertilidad; el clima cambia, el aire, el agua potable y los mares están cada vez más contaminados”. Castro Ruz, Fidel (2003:34).

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

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

Se entiende como biomasa toda aquella materia orgánica que procede directa o indirectamente de la energía solar, fijada en la tierra mediante el proceso de fotosíntesis. De hecho, la biomasa ha sido la base del suministro energético en épocas pasadas y aún lo sigue siendo en países subdesarrollados. La energía de la biomasa sigue llamando la atención como una fuente de energía útil y limpia.

En la actualidad se vuelve a la biomasa buscando soluciones energéticas eficientes que permitan nuevas concepciones económicas de su aprovechamiento para obtener una serie de beneficios, entre los que se encuentra la reducción de emisiones contaminantes a la atmósfera, fundamentalmente de CO_2, causante del efecto

invernadero (el CO_2 de la biomasa es neutro), SO_2, causante de la lluvia ácida, y otros contaminantes.

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

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

Si la quema de biomasa se realiza con eficiencia, mediante el perfeccionamiento de la aerodinámica del proceso de combustión y se aprovecha al máximo posible el calor contenido en los gases, una vez que estos han abandonado la zona de combustión, la eficiencia térmica general obtenida cuando se utiliza este tipo de combustible para satisfacer la demanda de calor del proceso de cocción tradicional debe aumentar de manera apreciable. Todo esto debe manifestarse en dos formas tangibles: reducción en el consumo de biomasa y reducción de los costos de fabricación y operación del sistema de combustión.

Ante las circunstancias anteriores y con el objetivo de utilizar las biomasas, para disponer de un combustible barato y al alcance de todos, se plantea el siguiente **problema científico**: No existe una tecnología de gasificación-combustión apropiada para el mejor aprovechamiento de las potencialidades energéticas de las biomasas, con bajos o altos niveles de densidad que se adapte con eficiencia a las condiciones de estas y que permita indistintamente lograr una respuesta apropiada, con transformaciones en las tecnologías de combustión.

Objetivos Generales

1 - Modificar el fogón que utiliza leña como combustible, en la cocción de alimentos en La EMA de Cumanayagua, con el propósito de incrementar su eficiencia en el sistema de combustión

2 - Establecer una metodología para el diseño de fogones gasificadores que utilicen como principio básico la multitubularidad en el combustible sólido.

Objetivos Específicos

1 - Revisar y resumir la bibliografía referente al tema de tecnologías de combustión y gasificación para el propósito de cocción de alimentos.

2 - Estudiar el comportamiento de las biomasas, en la eficiencia del sistema de gasificación-combustión que se investiga.

3 - Evaluar el fogón actual de La EMA para la cocción de alimentos.

4 - Determinar los parámetros geométricos y las relaciones dimensionales, de la tecnología y del combustible, que aseguren la gasificación de cualquier biomasa, en las condiciones de combustión de lecho fijo de capa gruesa.

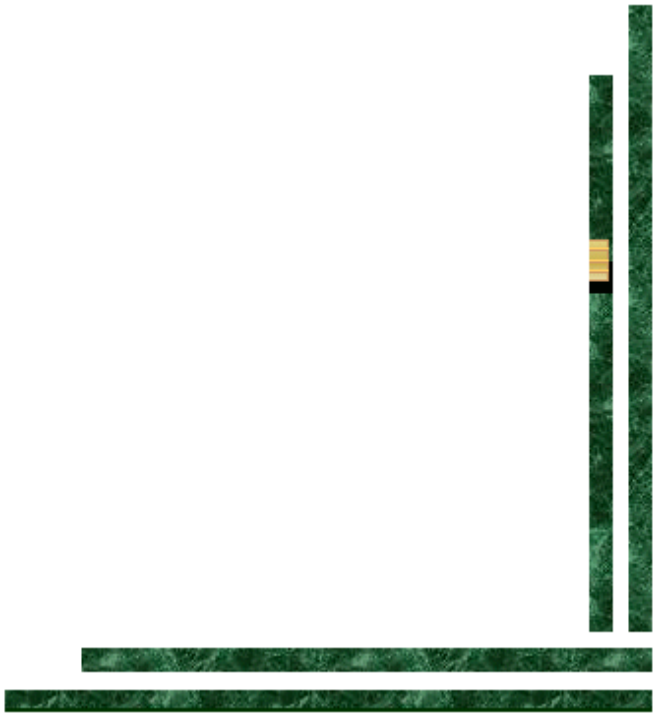
5 - Diseñar los elementos que aseguren la modificación del fogón actual y del prototipo.

6 - Realizar planos de conjuntos de la modificación del fogón actual y del diseño del nuevo prototipo de fogón para La EMA.

Hipótesis

Con la modificación del fogón existente en la EMA y el diseño de un nuevo prototipo de fogón gasficador, permitirá el empleo eficiente de los recursos biomásicos que se generan en el proceso del beneficio del café y la madera, así como la leña, lo cual redundará en un beneficio económico y medioambiental, además de la posibilidad que otros secunden estas ideas, para una generalización del uso de estos potenciales de combustibles residuales, que hoy constituyen un problema ecológico sin solución.

CAPÍTULO 1



CAPÍTULO I: Fundamento del proceso de combustión y gasificación de los combustibles sólidos.

1.1 - RESEÑA HISTÓRICA DE LOS COMBUSTIBLES SÓLIDOS.

En los años 1870 y a principios de los años 1880, los fuegos abiertos solían definirse como esencialmente ineficientes. Los investigadores al analizar el fuego lograron desarrollar estufas realmente mejoradas. El Dr. Grant Ballard-Tremeer y el Dr. Kirk Smith fueron los primeros científicos en descubrir que la llama de tres piedras podía ser más eficiente y más limpio en combustión que algunos hornos “mejoradas”. Teniendo en mente que las tecnologías indígenas se han desarrollado sobre incontables años de experimentación, son de gran valor y ha cambiado la perspectiva de los científicos que lidian contra las causas del sufrimiento humano. Observar las formas en que los expertos realizan este proceso ha enseñado a los ingenieros a diseñar tecnologías más avanzadas y modernas para cocinar, se han diseñado primariamente para lograr una combustión más limpia forzando el calor contra la olla sin aumentar las emisiones nocivas. Un fuego puede arder y ser limpio cuando cocineros expertos meten la leña poco a poco en el fuego midiendo el combustible. Esta ignición puede ser ardiente y útil cuando hay que preparar la comida o la bebida rápidamente. El calor pasa a quemar la madera sin producir mucho humo, ya que los gases de la combustión de la llama producida queman el humo mientras sale de la madera. En el laboratorio las estufas modernas ganan más puntos que cualquier fuego abierto, aunque estos se realicen bien. Una buena estufa ofrece otros beneficios además de ahorrar leña o reducir el humo, es la manera en que cocina la comida, es típicamente la calidad más apreciada por los que la usan. Es posible que con estos hornos mejorados sea más fácil, seguro y rápido cocinar con leña, además de contribuir a la belleza de la cocina, es más fácil de prender, requiere poco mantenimiento mientras quema y satisface las necesidades de la cocinera. Meneses Subarnaba, Yulien (2008:5).

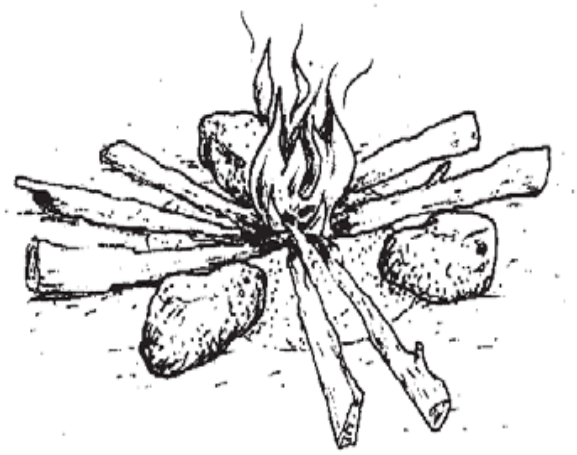


Fig.1.1 Fuego abierto tradicional.

1.2 - VARIANTES DE DISEÑO DE ESTUFAS Y SUS CARACTERÍSTICAS.

1.2.1 - Estufa Navivoti Chulha.

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

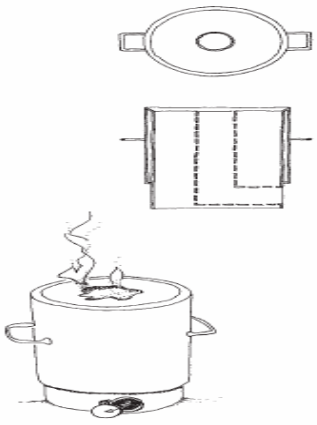


Fig.1.2 Estufa Navivoti Chulha.

1.2.2 - Estufa mejorada para la calefacción y cocción de alimentos, de procedencia Paquistaní.

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

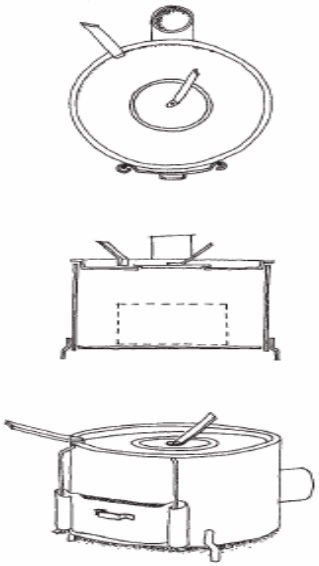


Fig.1.3 Estufa Mejorada Paquistaní.

1.2.3 - Estufa Institucional USIKA.

Es una estufa de gran demanda por el ahorro de combustible y por la eficiencia que alcanza (Cerca del 40%), utiliza leña como combustible pero puede usar briquetas de biomasas, se construye de chapas de acero o galvanizadas con recubrimientos de cerámica como aislantes interiormente. La olla cierra la cámara de combustión a la vez que está dentro de ella, los gases de la combustión se extraen por la chimenea.

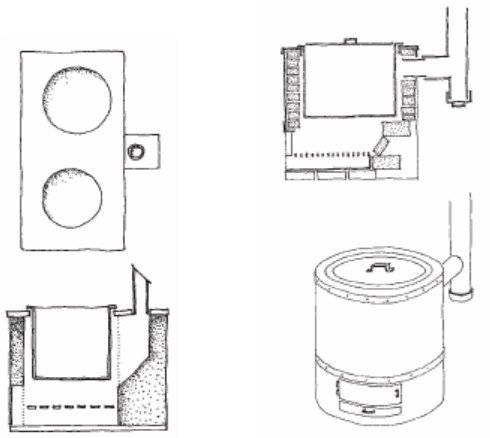


Fig.1.4 Estufa Institucional USIKA.

1.2.4 - Estufa Justa.

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

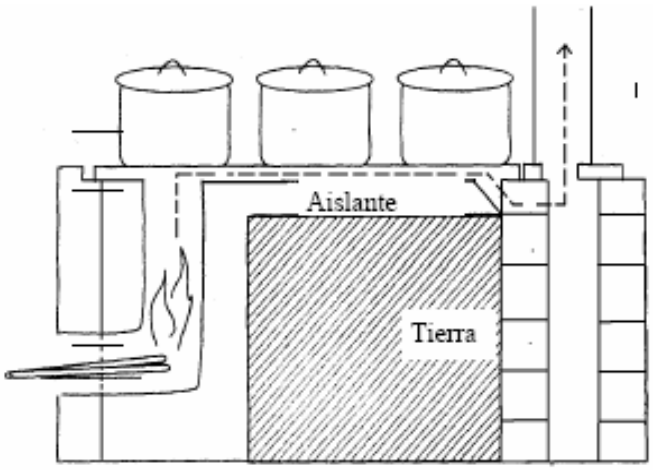


Fig.1.5 Estufa Justa.

1.3 - PROCESO DE COMBUSTIÓN DE LOS COMBUSTIBLES SÓLIDOS.

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

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

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

2 - Selección adecuada del tipo de quemador.

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

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

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

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

1 - Tener elevado poder calórico.

2 - No ser materia prima de ninguna industria.

3 - Que exista en cantidades abundantes.

4 - Que no sea tóxico, ni contaminante.

5 - Que sea fácil de manipular y transportar.

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

Dentro de los combustibles orgánicos los más utilizados son:

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

Artificiales: Carbón vegetal, coque, carbón pulverizado.

Líquidos: Naturales (petróleo).

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

Gaseosos: Naturales (gas natural).

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

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

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

$$C + O_2 \longrightarrow C\,O_2 + 32{,}8\ kJ/kg$$

$$H_2 + 1_2\,O_2 \longrightarrow H_2O + 142\ kJ/kg$$

$$S + O_2 \longrightarrow SO_2 + 165\ kJ/kg$$

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

Combustión Exotérmica: Es una combustión completa, ya que esta se lleva a cabo en el aire teórico necesario, o sea, se realiza sin exceso, ni defecto de aire, y se obtienen productos totalmente oxidados (CO_2, SO_2, etc.)

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

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

Las etapas de la combustión de los combustibles sólidos son:

1 – Calentamiento.

2 – Revaporización de humedad (secado).

3 – Liberación de sustancias volátiles y su combustión.

4 – Combustión del coque.

1.4 - BIOMASA.

La biomasa representa aproximadamente 1/3 de toda la energía que se consume en los países en vías de desarrollo y casi el 90 % de algunos de los países desarrollados. Más de 2 mil millones de personas siguen contando con combustibles de la biomasa y las tecnologías tradicionales para cocinar y como calefacción. Entre 1,5 y 2,0 mil millones de personas no tienen acceso a la electricidad.

El uso tradicional de combustibles de la biomasa es ineficiente y confía en fuentes económicas como bosques naturales que a su vez contribuyen a la deforestación. La baja eficiencia actual del uso de la biomasa significa que aunque la biomasa se consume globalmente en una proporción alta, produce sólo un nivel bajo de servicios de energía. Cápiro Chaviano, Yunier (2002:12).

En todas sus formas, actualmente la biomasa provee una cantidad aproximada de 1 250 millones de toneladas de petróleo equivalente (TPE), lo que representa casi el 14% del consumo anual de energía mundial.

La biomasa es la mayor fuente de energía en los países en vías de desarrollo, donde proporciona el 35% de todos los requerimientos de energía. En los países desarrollados, el uso de la energía de biomasa también es sustancial. Por ejemplo, la biomasa de EE.UU. constituye aproximadamente a 70 millones de (TPE), mientras que en La Unión Europea lo hace entre 20 y 40 millones de (TPE) al consumo de energía anual. El uso 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 CO_2 neutral. Éste es particularmente el caso con respecto a los residuos agrícolas o las plantas de energía, las cuales son periódicamente plantadas y cosechadas. Durante su crecimiento, estas plantas captan el CO_2 de la atmósfera para la fotosíntesis liberándose de nuevo durante la combustión.

Los combustibles biomásicos usados hoy en los países en desarrollo han sido llamados "el petróleo del hombre pobre" debido al uso directo para la combustión en la cocina doméstica. La biomasa puede ser llamada más apropiadamente "el petróleo de la mujer pobre" ya que las mujeres y los niños en las áreas rurales gastan una considerable

cantidad de tiempo colectando madera combustible y sufriendo el ambiente de la polución del aire interior causado por la combustión de la biomasa para calentar y cocinar. Los estudios en la India han encontrado que el nivel inhalado de benzopirenos carcinógenos por algunas mujeres en la cocina es equivalente a fumar 20 cajetillas de cigarros/día. Se estima que un asombroso 58 % de toda la exposición a las partículas de la polución aérea ocurre en las áreas rurales de los países en desarrollo.

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

Otro caso es el de los Estados Unidos que tienen alrededor de 8000 MW de capacidad instalada de generación de electricidad con biomasa combustible, principalmente como sistemas de producción de potencia y calor combinado. Los residuos de procesos industriales son los principales combustibles de biomasa usados en los países industrializados.

1.4.1 - Clasificación de los recursos de bioenergía.

Los recursos de bioenergía pueden ser clasificados en tres categorías:

1) **Residuos y basuras.**

Las producciones globales de residuos de la biomasa, incluso los derivados de alimentos, fibras, y producción de bosques, exceden 110 EJ/año (1 EJ=10^{18} joule), donde casi el 10 % de los cuales es usado para energía. Los residuos que se concentran en los sitios industriales son actualmente la fuente más grande de la

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

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

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

2) Crecimiento de cosechas de energía.

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

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

3) Vegetación natural.

La vegetación natural podría ser un recurso sostenible en algunas situaciones, pero no se ha usado sosteniblemente a gran escala. Por ejemplo, en muchos países, la tala de bosques naturales primarios (para energía, tierra para agricultura y otros usos) ha llevado a aumentar la erosión, pérdida del hábitat natural, emisiones de dióxido de

carbono (CO_2) a la atmósfera, y otros impactos negativos. Aunque habrá situaciones en las que puede usarse vegetación natural apropiadamente para energía, las pautas generales son difíciles de ofrecer para tales situaciones.

1.5 - GASIFICACIÓN.

1.5.1 - Introducción.

La producción de biogás a partir de materiales a base de carbono es una tecnología antigua, y a pesar de que las ventajas del proceso de gasificación fueron descubiertas a principios de los años de 1800, la utilización de esta tecnología se ha planteado como una alternativa viable hasta en los últimos 50 años. Schneider, Herbert E. (2008: 56).
El primer gasificador comercial de tiro vertical para gasificación continua de combustible fue instalado en 1839. Los gasificadores de este tipo fueron posteriormente desarrollados para utilizar diferentes combustibles y su uso en aplicaciones industriales específicas de potencia y calor duro hasta 1920, cuando su aplicación fue gradualmente desplazada por motores y hornos a base de aceite combustible.

En general, el desarrollo de la gasificación ha pasado por cinco etapas:

Entre los años 1850 a 1940. La gasificación se utilizó por primera vez en la producción de gas para el alumbrado público y la calefacción. Hasta el desarrollo de líneas de suministro y transmisión de gas natural en los años 1940 y 1950, prácticamente todo el gas se producía a partir de la gasificación del carbón.

Entre los años 1940 a 1975. La segunda etapa de gasificación se inició durante La Segunda Guerra Mundial, cuando los ingenieros alemanes utilizaron la gasificación para producir combustibles sintéticos ante un suministro poco confiable de petróleo entre 1920 y 1940.
Gasificadores compactos de tiro vertical fueron desarrollados principalmente para aplicaciones automotrices, pero poco tiempo después de finalizar la guerra, fueron sustituidos debido a la disponibilidad de una amplia gama de combustibles líquidos baratos.

Entre los años 1975 a 1990. La siguiente etapa en la evolución de los procesos de gasificación se inició después del embargo de Petróleo Árabe de 1973. En reacción a ese acontecimiento y a la consiguiente "crisis energética", la gasificación fue percibida como una alternativa relativamente barata para aplicaciones industriales en pequeña escala y de gran utilidad para la generación de potencia en aquellos países en desarrollo que sufrían con los altos precios del petróleo en el mercado mundial, pero tenían recursos suficientes y sostenibles de biomasa.

Varias naciones comienzan a ofrecer apoyo financiero a varios proyectos enfocados en el desarrollo de prototipos de gasificadores, incluido la primera planta eléctrica de Gasificación Integrada de Flujo Combinado del mundo (IGCC por sus siglas en ingles). Otro acontecimiento durante este período fue la conversión de la planta manufacturera “Eastman Chemical” en Estados Unidos, que pasó de u

tilizar petróleo para sus procesos productivos, a usar biogás producido a partir del carbón, sentando un precedente en la viabilidad de su uso a escala industrial.

Entre los años 1990 a 2000. La cuarta etapa en el desarrollo de la gasificación comenzó a principios del decenio de 1990 cuando los organismos gubernamentales en los Estados Unidos y Europa prestaron apoyo técnico y financiero a varios proyectos de gasificación integrada de mediana escala (≈250 MWe) para "demostrar" la viabilidad del proceso de gasificación integrada en ciclo combinado.

Año 2000 al presente. La actual etapa en la evolución de la gasificación inició cuando los desarrolladores comerciales comenzaron la construcción de gasificadores integrados de ciclo combinado de energía sin los subsidios del gobierno. Estas nuevas instalaciones de gasificación integrada de ciclo combinado generalmente se ubican adyacentes a las refinerías donde coque de petróleo y otros hidrocarburos residuales se pueden conseguir fácilmente.

1.5.2 - Aplicaciones comunes.

Los combustibles fósiles son recursos finitos y distribuidos de forma desigual, lo que da lugar a cierta dependencia hacia los países que lo poseen. Con la disminución mundial

de las reservas de petróleo y gas natural, el único camino hacia un futuro en el que los precios de la energía sean asequibles y relativamente estables, es la conservación de la energía, la mejora en la eficiencia energética y la producción de energía eléctrica, productos químicos, fertilizantes, y combustibles limpios, a partir de los abundantes recursos como el carbón o la biomasa, y por tanto, a relativamente bajo costo.

A pesar de que el biogás tiene un poder calorífico menor al del gas natural, igualmente puede utilizarse en plantas eléctricas con ciclo combinado de alta eficiencia para generar energía eléctrica o para hacer otros productos actualmente elaborados a partir de gas natural, entre ellos fertilizantes de amoniaco, productos químicos derivados de metanol y combustibles sintéticos limpios. El gas producido es quemado en la turbina de gas, con la posibilidad de producir metano e hidrogeno para celdas de combustible. El ciclo combinado de gasificación es el método más eficiente para la obtención de CO_2 comparado con las tecnologías convencionales disponibles.

La capacidad de la tecnología de la gasificación para desplazar el uso del gas natural y el petróleo es motivo suficiente para alentar el desarrollo rápido y generalizado de esta tecnología. Sin embargo, hay al menos otras tres razones por las cuales la gasificación debería ser la tecnología de elección:

1. El biogás procedente de la gasificación es limpiado a fondo antes de que sea utilizado en un IGCC, por ello, es posible eliminar gran parte de las emisiones de contaminantes atmosféricos peligrosos (como el mercurio volátil del carbón) con proyectos de energía basados en esta tecnología.
2. A diferencia de los sistemas de generación a base de gas natural u otros sistemas a base de carbón, las centrales eléctricas basadas en la gasificación, pueden ser configuradas para permitir la captura de dióxido de carbono, cuando se requiera, para satisfacer compromisos legales o las obligaciones de los tratados internacionales en cuanto a emisiones nocivas.
3. La gasificación, es una tecnología energética (además de la fisión nuclear) capaz de producir las cantidades masivas de hidrógeno que serían necesarias para convertir la totalidad o una parte importante de la flota de transporte del mundo, de combustibles fósiles como la gasolina y el gasóleo, a combustibles limpios como el hidrógeno.

1.5.3 - Gasificación.

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

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

1. La materia prima (hidrocarburo) es introducida al reactor químico (gasificador), el cual se encuentra a alta presión y alta temperatura, conteniendo vapor y una limitada cantidad de oxígeno.
2. Bajo estas condiciones de reducción, los enlaces químicos del hidrocarburo son rotos debido a la alta presión y temperatura, dando lugar a la formación de biogás o gas de síntesis. Este gas, es principalmente, una mezcla de hidrogeno y monóxido de carbono.
3. Luego, el gas generado, es filtrado para remover partículas dañinas como el azufre y algunas trazas metálicas como el mercurio.

1.5.4 - Diferencia entre gasificación y combustión.

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

Combustible + Oxígeno Calor + Agua + Dióxido de Carbono (ec.1.2)

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

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

Combustible + Oxígeno (limitado) Hidrógeno + Monóxido de Carbono (+ un poco de agua y dióxido de carbono) (ec.1.3)

1.5.5 - Gasificador.

El gasificador es el "corazón" del proceso de gasificación. El gasificador es el medio físico mediante el cual se proporcionan las condiciones adecuadas para llevar a cabo la gasificación del combustible y en la actualidad son cuidadosamente elaborados para procesarlo de varias maneras de acuerdo al tipo de combustible, la finalidad del biogás, el tamaño del proceso y la fuente de oxígeno. El oxígeno puede ser introducido como un gas puro o puede venir como una mezcla de aire o vapor.

1.5.6 - Proceso de gasificación.

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

1.5.7 - Termoquímica del proceso de gasificación.

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

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

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

3) Reducción o gasificación: La constituyen las reacciones sólido-gas o en fase gas, mediante las que el sólido remanente se convierte en gas. Se trata de reacciones fundamentalmente endotérmicas, algunas de las cuales tienen lugar en muy poca extensión, o solo tienen lugar en determinadas condiciones, como ocurre con algunas reacciones de hidrogenación y/o reformado.

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

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

$$C + 02 = C02 + 401.9\ kJ/mol \qquad \text{(ec.1.4)}$$

$$H + ½02 = H20 + 241.1\ kJ/mol \qquad \text{(ec.1.5)}$$

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

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

$$C + C02 + 164.9\ kJ/mol = 2C0 \qquad \text{(ec.1.6)}$$

$$C + H20 + 122.6\ kJ/mol = CO + H2 \qquad \text{(ec.1.7)}$$

$$C02 + H2 + 42.3\ kJ/mol = CO + H20 \qquad \text{(ec.1.8)}$$

$$C + 2H2 = CH4 \qquad \text{(ec.1.9)}$$

$$CO + 3H2 = CH4 + H20 + 205.9\ kJ/mol \qquad \text{(ec.1.10)}$$

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

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

$$kW = ([CO] * [H20]) / ([C02] * [H2]) \qquad \text{(ec.1.11)}$$

En la práctica, la composición de equilibrio del gas solamente será alcanzada en los casos en que la tasa de reacción y el tiempo para la reacción sean suficientes. La tasa de reacción disminuye con la temperatura. Debajo de los 700 °C la reacción agua-gas se vuelve muy lenta sin un catalizador. Entonces la composición del gas permanece constante, y el metano solamente será generado a temperaturas muy elevadas, mayores de 1200°C. El concepto del equilibrio agua-gas brinda la oportunidad de calcular teóricamente la composición del gasificador, que ha alcanzado el equilibrio a una temperatura dada.

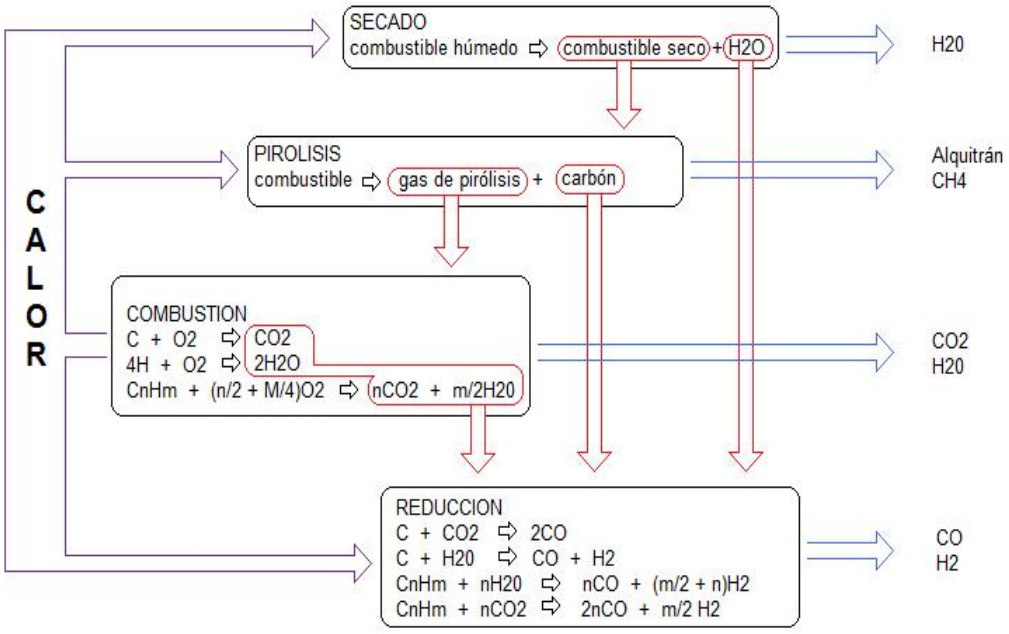


Figura 1.6 Etapas de la gasificación.

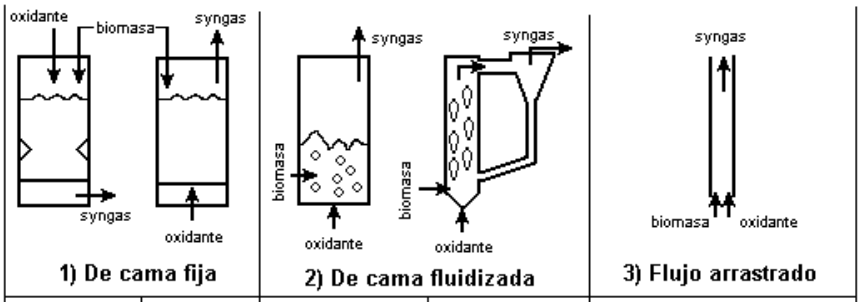
1.5.8 - Tipos de gasificadores.

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

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

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

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



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

Figura 1.7 Cuadro comparativo entre los distintos tipos de gasificadores.

1.5.9 - Ventajas y desventajas según el tipo de gasificación.

Contra corriente (updraft).

Ventajas:

- Simplicidad en su construcción y uso.
- Baja temperatura del biogás producido.
- Alta eficiencia en la gasificación.
- Puede utilizarse combustible con alta humedad.

Desventaja:

- Gran cantidad de brea, alquitrán y productos de pirolisis son producidos.

Corriente paralela (downdraft, crossdraft).

Ventaja:

- Amplio rango de potencias desde 80 kW hasta 500 kW.

Desventajas:

- Alta cantidad de cenizas en los gases de combustión.
- El combustible debe ser previamente preparado.
- Alta temperatura de los gases producidos.
- Baja eficiencia térmica en la gasificación.
- Debe utilizarse biomasa muy seca.

Cama fluidizada.

Ventajas:

- Rendimientos mayores a los gasificadores de tipo “cama fija”.
- Puede trabajar con combustibles altamente corrosivos.

Desventajas:

- Debe utilizarse un combustible altamente reactivo.
- La ceniza generada, generalmente es altamente corrosiva.

Flujo arrastrado.

Ventajas:

- Alcance de altos desempeños.
- Las altas temperaturas garantizan la ausencia de breas y alquitranes.
- Eliminación de las cenizas en forma de escoria.
- Utilización a gran escala.

Desventajas:

- Mayor consumo de aire primario.
- La pulverización o atomización del combustible.
- Mayores necesidades energéticas.

1.6 - COMBUSTIÓN.

La generación de calor se lleva a cabo, generalmente a través de una reacción química de oxidación, también conocida como combustión. La reacción de combustión se basa en la reacción química exotérmica de una sustancia, denominada combustible, con el oxígeno. Es característica de la reacción de combustión la formación de una llama, que es una masa gaseosa incandescente que emite luz y calor y que está en contacto con la sustancia combustible.

La combustión puede llevarse a cabo directamente con el oxígeno o bien con una mezcla de sustancias que contengan oxígeno. Esta mezcla de sustancias que contiene oxígeno se denomina comburente, siendo el aire el más comúnmente utilizado. Los elementos fundamentales de los combustibles son carbono, hidrógeno y azufre como elementos verdaderamente combustibles y otros tales como nitrógeno, oxígeno y cenizas que serán considerados inertes. Una vez que tiene lugar la reacción entre combustible y comburente se liberan los productos de la combustión en forma de humos. Los parámetros fundamentales a tener en cuenta serán el suministro de combustible y comburente, de tal forma que la cantidad de aire sea la adecuada y la mezcla, lo mejor posible, la temperatura de la llama y el tiempo de permanencia para permitir que la combustión sea completa evitando la existencia de inquemados. El uso 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 CO_2 neutral. Este es particularmente el caso con respecto a los residuos agrícolas y las plantas de energía, las cuales son periódicamente plantadas y cosechadas. Durante su crecimiento estas plantas captan el CO_2 de la atmósfera para la fotosíntesis liberándose de nuevo durante la combustión, por ejemplo:

- Más de 2 mil millones de personas siguen contando con combustibles de la biomasa y las tecnologías tradicionales para cocinar y como calefacción.
- La biomasa en EE.UU. constituye aproximadamente 70 millones de toneladas equivalentes de petróleo (tep).
- En Europa entre los 20 y los 40 millones de (tep), es el consumo de la energía anual.

1.7 - FOGONES EFICIENTES.

Eficiencia de los fogones.

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

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

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

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

d = ½D.

2) La distancia de la olla a la parrilla (h) es la mitad del diámetro de la olla. (D): h = ½D.

1.7.1 - Fogón de leña modelo ‘’ Doña Justa’’.

Este fogón es la combinación del fogón tipo ‘’Plancha’’ que promovía Proleña /Hondura, con el fogón ‘’Rocket ‘’ que promovía el Instituto Aprovecho de Oregón, EE.UU. La plancha permitía un nivel de emisiones muy bajo mientras el Rocket permitía una combustión más eficiente por el efecto turbo que genera un pequeño tiro de aire caliente exactamente arriba de la cámara de combustión. El fogón ‘’ Doña Justa’’ fue desarrollado en Honduras en el año 1998 por el Instituto Aprovecho, Proleña y con el

apoyo de la ONG estadounidense Forest Wats and People. El fogón consiste en un codo de cerámica como cámara de combustión, la parte horizontal del codo es la cámara de combustión, donde se sitúa el combustible, la parte vertical del codo, termina en un espacio hermetizado por una plancha metálica cuadrada de 3mm de espesor y 50cm de codo, al fondo de la misma se localiza una chimenea cuadrada de 10cm de lado y de 2/3 m de altura.

Características del fogón Doña Justa.

1 - Eficiencia inferior al 20 % (cerca de 16 %).
2 - La madera debe ser picada en pequeños trozos por las dimensiones limitadas del fogón, situación apropiada para la utilización de briquetas de biomasas.
3 - Insignificante emisor de humos por la hermeticidad lograda con la plancha y por el efecto chimenea.
4 - Pérdidas por radiación en la plancha plana, aunque existe la posibilidad del uso directo de las mismas en determinada aplicación.
5 - El costo está entre 40 y 50 USD.

1.7.2 - Fogón para leña J.P.V.C.

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

1.7.3 - Fogón recuperativo para biomasas P.F.B.A.

Este fogón fue diseñado y construido en La Universidad de Cienfuegos en el año 1996. Con características semejantes al J.P.V.C. pero con algunas diferencias importantes. Con la cámara de combustión mayor y dispuesta de forma que las hornillas hendidas lo más cercana posible a la puerta de alimentación con mayor profundidad que la dispuesta en la dirección de la salida de los gases en combustión; para aprovechar el calor radiante de las paredes laterales y el calor de conducción del fondo, permitiera incrementar la eficiencia con un volumen sobre la parrilla 2/3 del volumen total y con toberas en la parte superior (aire secundario) con diferentes ángulos para facilitar el mezclado del aire con los volátiles de la biomasa en combustión primaria. Además una parrilla dinámica para el desprendimiento de las cenizas y por consiguiente, activación de la combustión en briquetas macizas de biomasas residuales, un horno intercalado a la salida de los gases de escape para la recuperación del calor.

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

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

1.7.4 - Principio de funcionamiento del Fogón- Gasificador.

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

gasificación, bajas temperaturas dan lugar a la pirolisis clásica). Sin embargo para la combustión de los gases combustibles que se forman, se requiere de una entrada adicional de aire secundario por encima del nivel del combustible.

Para ello se utiliza una alternativa:

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

Las etapas del proceso de combustión son:

1 - Evaporización de la humedad.

2 - Emisión y combustión de volátiles.

3 - Combustión del coque.

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

El proceso de combustión de aire secundario tiene diferentes funciones:

- Suministrar el oxígeno necesario para completar el proceso de combustión, logrando que la mayor parte de CO sea producido por CO_2.
- Suministrar diferenciadamente el aire de manera que el aire primario a través de la parrilla e incidiendo sobre las llamas, solo sea la fracción total necesaria para evitar el enfriamiento excesivo de esta zona, la cual actúa definitivamente sobre la velocidad de la reacción.
- Crear una turbulencia, captar y recircular las partículas volantes no quemadas completamente.
- El aire secundario contribuye a disminuir tanto las pérdidas de calor por incombustión química (q_3, %), como las pérdidas de calor por incombustión mecánica (q_4, %).

Conclusiones parciales

1 - Todas las variantes de fogones y estufas analizados en la literatura utilizan el principio de dos combustiones, combustión primaria y combustión secundaria.

2 - La eficiencia del sistema térmico semiabierto depende de:

a) Aforamiento de la superficie de la cámara vinculada con el proceso de combustión.
b) De la holgura entre la olla y la cámara de combustión, (distancia al combustible).
c) Espesor de la olla.

3 - La eficiencia del sistema térmico cerrado depende de:

a) Aforamiento de la superficie de la cámara vinculada con el proceso de combustión.
b) Espesor de la olla.
c) El volumen y orientación del aire secundario por encima del combustible, que garantiza el adecuado mezclado de los gases combustibles que se generan en la combustión primaria.

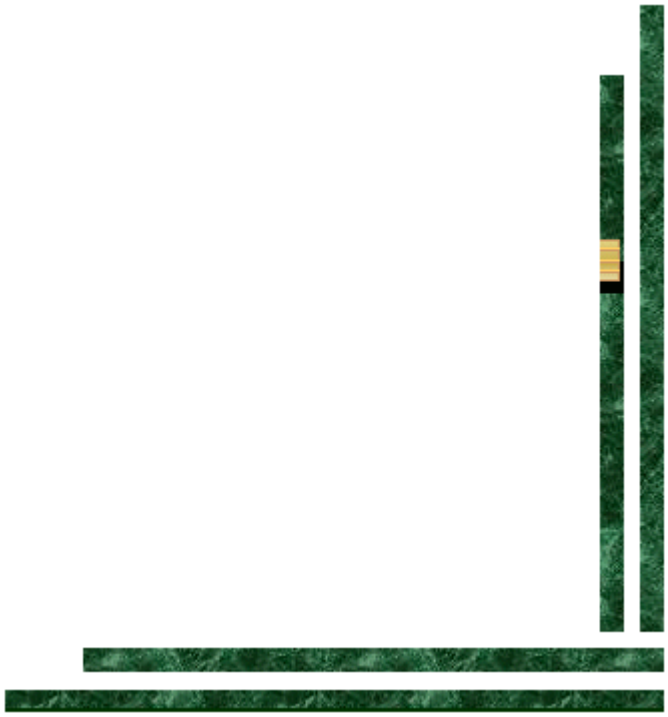
4 - La madera es el combustible sólido que más se utiliza en la cocción de alimentos, y las tecnologías de combustión están diseñadas a satisfacer las exigencias de este combustible.

5 - La posibilidad del uso de las biomasas no leñosas en sus estados naturales, con alto grado de granulometría, no se toman en cuenta como alternativas de combustibles en los diseños de fogones y estufas analizados.

6 - No se hace referencia a estufas o fogones que puedan ser utilizados para diferentes combustibles sólidos, en sus diferentes estados, sin variaciones apreciables de su estructura interna.

7 - La alternativa de la gasificación de las biomasas en general, para la cocción de alimentos está pobremente tratada en la literatura, aunque se dispone de suficiente información y experiencia en este tipo de proceso de transformación termoquímica, la dificultad radica en los requisitos que se necesitan para la garantía de un productivo y eficiente proceso de gasificación, con un mínimo de costos y con una tecnología apropiada que se adapte a los requerimientos de esta aplicación.

CAPÍTULO 2



CAPÍTULO II: Evaluación y determinación de la eficiencia térmica del fogón de leña de la Empresa Agroindustrial de Cumanayagua (EMA).

2.1 - METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN PARA DETERMINAR LA EFICIENCIA DEL SISTEMA TÉRMICO DEL FOGÓN DE LEÑA DE LA EMA.

2.1.1 - Caracterización de la tecnología de combustión.

- En la figura se muestra las dimensiones geométricas del fogón.

Fig.2.1 Vista lateral del fogón.

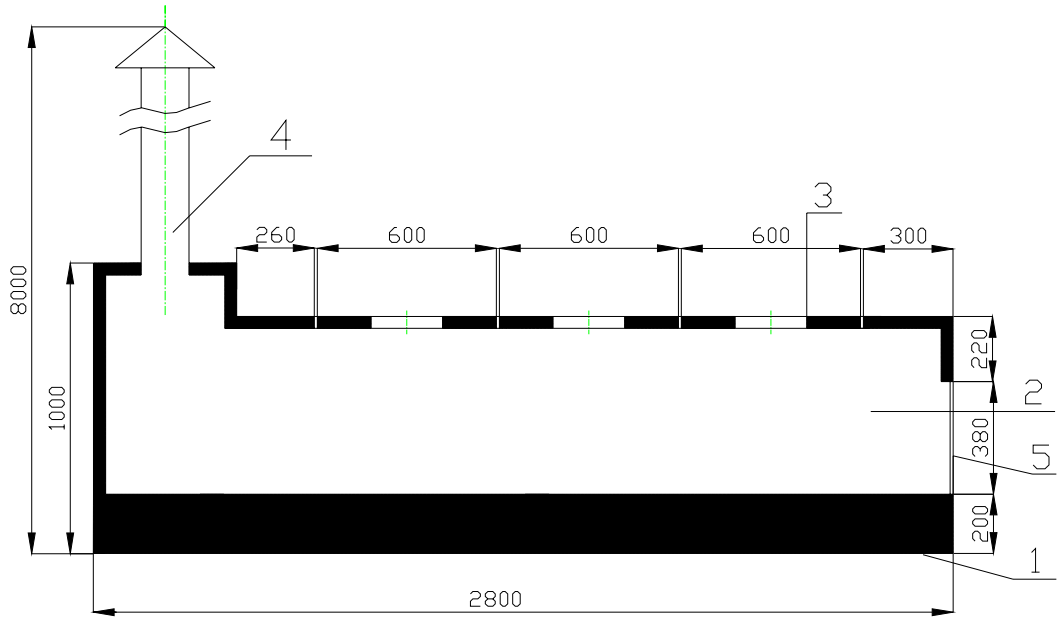


Fig.2.2 Vista superior del fogón.

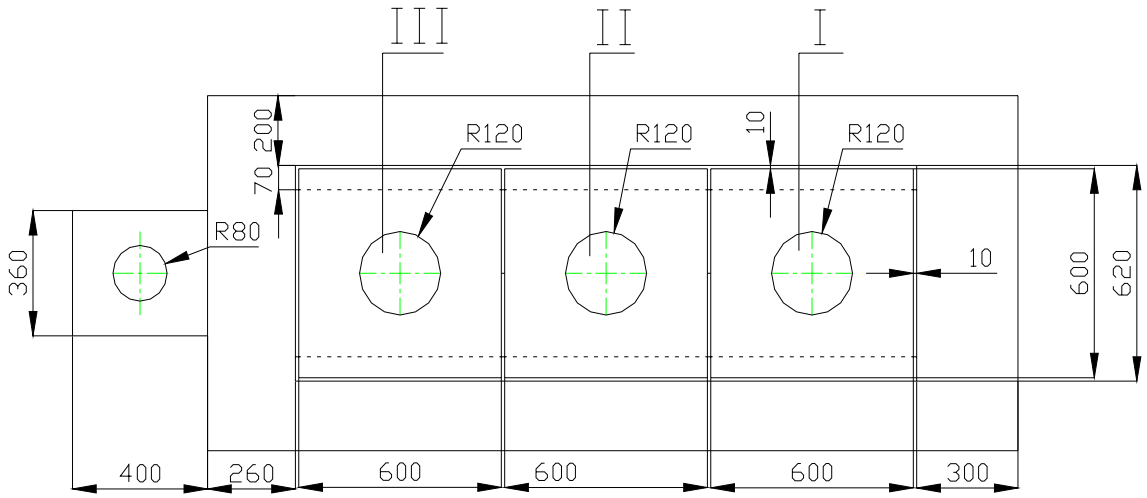
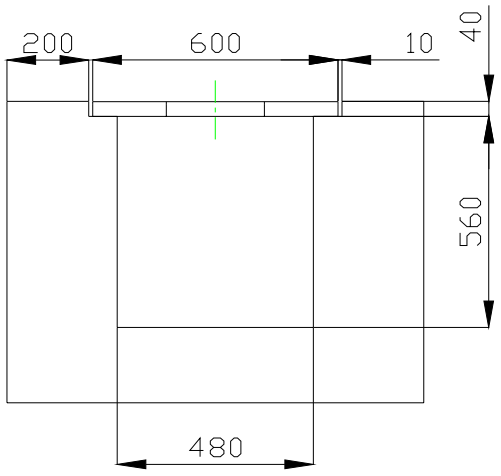


Fig.2.3 Vista frontal de la cámara de combustión.



2.1.2 - Caracterización de las diferentes partes componentes del fogón.

1. **Cuerpo del fogón.**

Estructura de bloque con revestimiento exterior que forma un canal abierto y en su porción posterior termina con un conducto de sección rectangular para la colocación de la chimenea.

2. **Cámara de combustión.**

Constituye la parte interior del cuerpo del fogón con revestimiento de ladrillos refractarios y alcanza hasta la parte inferior del conducto de la chimenea, la misma posee un volumen físico disponible para el combustible de 0.64512m^3 y su sección trasversal es constante

3. **Hornillas planas.**

Son fabricadas de Hierro Fundido con un espesor de 40mm, una dimensión para cada una de 600 * 600mm. Su misión es cerrar la cámara de combustión y soportar la olla de cocción. Se asienta en la parte superior del cuerpo del fogón, convirtiendo el mismo en un cuerpo cerrado. Las hornillas poseen diferentes diámetros de orificios en la parte central de 240mm, 180mm y 40mm respectivamente, que aseguran la comunicación directa del calor de los gases de combustión con el fondo de la olla según sean los requerimientos de calor para la cocción de alimentos.

4. **Chimenea.**

La chimenea es de aluminio, con un diámetro de 160mm y una altura de 7m, suficiente para asegurar el movimiento de aire y gases de combustión en el interior de la cámara de combustión.

5. **Puerta de cierre de la cámara.**

Puerta rectangular de Acero al Carbono sin aislamiento en la entrada de la cámara de combustión y articulada mediante bisagras a la parte posterior del cuerpo del fogón.

2.2 - CARACTERIZACIÓN DEL COMBUSTIBLE.

2.2.1 - Tipo de combustible que utiliza.

El fogón para su funcionamiento utiliza como combustible sólido la Biomasa, en especial (leña).

2.2.2 - Dimensión promedio de los elementos combustibles.

La leña se corta a una longitud promedio de 1.85m a lo largo de toda la cámara de combustión y su diámetro varía entre 100 y 300mm.

2.2.3 - Humedad del combustible.

Para la obtención de la humedad del combustible se tomó una muestra del combustible (leña) de 250mm de longitud y 110mm de diámetro, la cual se pesó, donde se obtuvo una masa inicial de w_0=2.70kg. Posteriormente se puso al contacto con el calor de la hornilla durante un tiempo de 4 horas, se volvió a pesar y se obtuvo una masa final de w_f=2.10kg. Esta prueba dio la posibilidad de obtener los resultados siguientes:

$$H = \frac{\omega_0 - \omega_f}{\omega_0} \cdot 100 \qquad \text{(ec.2.1)}$$

$$H = \frac{2.70 - 2.10}{2.70} \cdot 100 = 22.22\ \%$$

2.2.4 - Densidad del combustible.

Para obtener la densidad del combustible se tomó la muestra de combustible de la prueba anterior, tomando como datos las dimensiones L=250mm, D=110mm y la masa inicial w_0=2.70kg. Para esto se determinó el volumen de la muestra por la siguiente expresión.

Cálculo del volumen de la muestra de combustible de la prueba anterior.

$$V = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot L \qquad \text{(ec.2.2)}$$

$$V = \frac{\pi \cdot (0.11)^2}{4} \cdot 0.25 = 0.00237\ m^3$$

Cálculo de la densidad del combustible.

$$\rho = \frac{w}{V} = \frac{2.70}{0.00237} = 1137.32 \, {kg}/{m^3} \qquad \text{(ec.2.3)}$$

2.2.5 - Tiempo de ignición del combustible.

Para la determinación del tiempo de ignición del combustible se tomó durante cinco días el tiempo que demora en arder la leña y se determinó un tiempo de ignición de 15 a 20 minutos.

2.2.6 - Cantidad de combustible (Diesel) que se utiliza hasta lograr la ignición de la leña.

Para lograr la ignición del combustible se utiliza 0.5 litro por día, lo que hace un consumo de 12 litros mensuales.

2.2.7 - Funcionamiento del fogón.

Fig.2.4 Vista del fogón actual de La EMA.

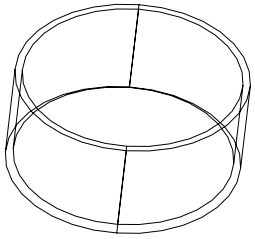
Se introduce una masa inicial de 40kg de leña aproximadamente en la cámara de combustión, colocada al azar y a toda la longitud de la cámara, se le rosea 0.5 litro de petróleo para logra la ignición de la leña. Una vez logrado esto, se procede a la colocación de las ollas para el comienzo del proceso de cocción de los alimentos, el potaje que es el alimento que más tiempo demora para su cocción se coloca en la tercera hornilla (Se localiza cerca de la chimenea), mientras que los restantes alimentos

varían indistintamente por las hornillas restantes. A medida que ocurre el proceso de cocción se va suministrando combustible (leña) mientras que disminuya la llama de la combustión, hasta el proceso final de la cocción, en que se tapan los orificios de las hornillas y el fogón se mantiene con la energía del carbón producido por la leña.

2.3 - CARACTERIZACIÓN DE LAS OLLAS QUE SE UTILIZAN PARA LA ELABORACIÓN DE ALIMENTOS.

2.3.1 - Dimensiones y capacidad de las ollas que se utilizan para la cocción de alimentos.

- Figura 2.5 Olla cilíndrica para la elaboración de potajes.



D=600 mm
Espesor=15 mm
H=200 mm

Volumen total de la olla para la elaboración de potajes.

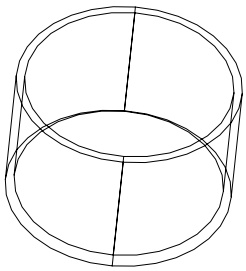
$$V = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot h \qquad \text{(ec.2.4)}$$

$$V = \frac{\pi \cdot (0.6)^2}{4} \cdot 0.2$$

Material de la olla.

- Aluminio.

- Figura 2.6 Olla cilíndrica para la elaboración de otros alimentos.



D=500 mm
Espesor=10 mm
H=260 mm

Volumen total de la olla para la elaboración de otros alimentos.

$$V = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot h \qquad \text{(ec.2.5)}$$

$$V = \frac{\pi \cdot (0.5)^2}{4} \cdot 0.26$$

$$V = 0.051\, m^3 = 51\, litros$$

Material de la olla.

- Aluminio

2.4 - EVALUACIÓN DEL SISTEMA TÉRMICO.

2.4.1 - Tiempo de comienzo de ebullición del agua en las distintas ollas y en cada hornilla, para determinar cual hornilla aporta mayor calor.

Se realizó una prueba de agua con las distintas ollas y por cada hornilla, con una masa de combustible inicial de 40kg, y un volumen de agua de 20 litros en cada una de las ollas.

Tabla 2.1 Resultados de la prueba, con la olla destinada a la elaboración de potajes, con un volumen de 20 litros de agua.

Hornilla	I	II	III
Tiempo en ebullir	44min.	38min.	35min.

Tabla 2.2 Resultados de la prueba, con la olla destinada a la elaboración de otros alimentos, con un volumen de 20 litros de agua.

Hornilla	I	II	III
Tiempo en ebullir	36min.	24min.	20min.

Observación:
Se llegó a la conclusión que la hornilla que aporta mayor cantidad de calor para la cocción de los alimentos, es la tercera.

2.4.2 - Tiempo promedio de duración de algunos alimentos hasta la cocción, con sus ollas correspondiente.

- Tabla 2.3 Resultados obtenidos en la prueba de cocción de alimentos.

Alimentos	Hornilla I	Hornilla II	Hornilla III
Chícharos			5h
Frijoles			4h: 45min.
Arroz		45min.	
Espaguetis		60min.	
Pollo		1h: 15min.	
Harina de Maíz	1h: 45min.		
Picadillo		60min.	
Sopa			3h: 10min.
Café	20min.		

Observación:

La tabla muestra el tiempo promedio que demora cada alimento para su cocción en los días que se cocinaron potajes, los cuales se llevan la mayor parte del tiempo y por esta razón se utiliza la hornilla que aporta mayor calor. Los días que no se cocinan potajes, los demás alimentos varían por las tres hornillas.

2.4.3 - Prueba de gasto de combustible promedio que se utiliza por día.

Para esta prueba se escogió un día en que se cocinó potajes, que es el alimento que más combustible utiliza. Se tomó una muestra de 200kg de leña, se suministró una masa inicial de 40kg en la cámara de combustión y se continuó suministrando combustible durante el tiempo de cocción de los alimentos. Luego de terminado el proceso de cocción, se pesó la leña restante y se obtuvo una masa de 50kg.

Observación:

Se obtuvo como resultado de la prueba, que la masa total de combustible promedio que se utiliza en los días que se cocinan potajes es de 150kg de leña. Los días que no se cocinan potajes la cantidad de leña puede disminuir, aunque no significativamente.

2.4.4 - Prueba de agua con una masa de agua determinada en una olla durante un tiempo determinado y con la masa de combustible equivalente a la hornilla.

Para esta prueba se tomó como referencia la hornilla que aporta mayor calor y con el alimento que más tiempo demora para la cocción. En este caso se tomó una muestra de agua de 50 litros en una olla y se colocó en la tercera hornilla. Se midió la altura equivalente a 50 litros de agua y se obtuvo una altura H=180mm. Se suministró inicialmente una masa de leña w=40kg, colocada al azar y a toda la longitud de la cámara, la cual se fue incrementando a medida que la llama de la combustión disminuía en la cámara de combustión hasta alcanzar las 5 horas correspondientes a la cocción de los chícharos, donde se obtuvieron los siguientes resultados.

Observación:

En la prueba se obtuvieron los resultados siguientes.

- Masa inicial de agua, w_0=50 litros = 50kg
- Altura correspondiente a 50 litros de agua, H_0=180 mm
- Tiempo en que comenzó a ebullir el agua, T_0=50min.
- Tiempo equivalente hasta la cocción de los chícharos, $T_{cocción}$=5h.
- Altura de agua en la olla hasta la cocción de los chícharos, H=55mm.

Tiempo que se puede utilizar la energía del combustible luego de terminado el proceso de cocción, con la masa de combustible que queda en la cámara.

- Tiempo hasta la terminación de la energía del combustible luego de transcurrido el proceso de cocción, T_{final}=1h: 45min
- Altura de agua en la olla hasta el tiempo total de terminación de la energía del combustible 6h: 45min, H=8mm.

Determinación de la masa de agua resultante de la prueba de agua.

Factor de Escala.

$$\mu_v = \frac{w_0}{H_0} = \frac{50\,l}{180\,mm} = 0.27\ {}^{l}\!/_{mm} \qquad \text{(ec.2.6)}$$

Ecuación para determinar la masa de agua resultante de la prueba

$$V_{cocción} = \mu_v \cdot H \qquad \text{(ec.2.7)}$$

Masa de agua final luego de transcurridas las 5 horas correspondientes a la cocción de los chícharos, ecuación (2.7).

$$V_{cocción} = 0.27\ {}^{l}\!/_{mm} \cdot 55\ mm = 14.85\ l \Rightarrow m_{agua} = 14.85\ kg$$

Masa de agua final, luego de trascurridas las 6h: 45min correspondientes a la duración total de la energía del combustible ecuación (2.7).

$$V_{cocción} = 0.27\ {}^{l}\!/_{mm} \cdot 8\ mm = 2.16 l \Rightarrow m_{agua} = 2.16\ kg$$

2.5 - BALANCE DE ENERGÍA.

Todos los combustibles, presentan una energía caracterizada por su valor calórico inferior, y donde participan otros factores como: la masa, la densidad, 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. Fundora Beltrán, Pedro (2003:83).

2.5.1 - Eficiencia del sistema térmico a partir de los resultados experimentales.

$$\eta_{sc} = \frac{Qa'}{Q'cb} \cdot 100 \qquad \text{(ec.2.8)}$$

Donde:

$\eta_{sc} \Rightarrow$ Eficiencia del sistema térmico, %.

$Qa' \Rightarrow$ Calor absorbido por el agua, kJ/kg.

$Q'_{cb} \Rightarrow$ Calor cedido por el combustible (valor calórico inferior), kJ/kg.

Ecuación para determinar el calor absorbido por el agua.

$$Qa' = C_{pa}(T_f - T_o) + (1 - \frac{w_f}{w_o}) \cdot \nu, kJ/kg \quad \text{(ec.2.9)}$$

Donde:

$C_{pa} \Rightarrow$ Calor específico molar del agua a presión constante. C_{pa} = 4.18kJ/kg

$T_f \Rightarrow$ Temperatura final del agua, T_f =373K

$T_o \Rightarrow$ Temperatura inicial del agua, T_o =300K

$w_o \Rightarrow$ Masa inicial del agua, kg.

$w_f \Rightarrow$ Masa final del agua en la olla, después de la evaporación (resultado del experimento), kg.

$\nu \Rightarrow$ Calor latente del agua, a la temperatura de 373K. ν =2253,02 kJ/kg.

Ecuación para determinar el calor cedido por el combustible.

$Q'_{cb} = V_{cb} \Rightarrow$ Valor calórico del combustible, kJ/kg.

$$V_{cb} = 17765 - 20273 \cdot H \quad \text{(ec.2.10)}$$

Donde:

H- humedad del combustible (leña: aroma).

Cálculo del calor absorbido por el agua ecuación (2.9).

$$Qa' = C_{pa}(T_f - T_o) + (1 - \frac{w_f}{w_o}) \cdot \nu, kJ/kg$$

$$Qa' = 4.18\,(373 - 300) + (1 - \frac{14.85}{50}) \cdot 2253.02$$

$$Qa' = 1889.01\,kJ/kg$$

Cálculo del calor cedido por el combustible ecuación (2.10).

$$Q'_{cb} = V_{cb} = 17765 - 20273 \cdot H$$

$$Q'_{cb} = 17765 - 20273 \cdot 0.222$$

$$Q'_{cb} = 13264.39 \; {kJ}/{kg}$$

Cálculo de la eficiencia del sistema térmico ecuación (2.8).

$$\eta_{sc} = \frac{Qa'}{Q'cb} \cdot 100$$

$$\eta_{sc} = \frac{1889.01}{13264.39} \cdot 100$$

$$\eta_{sc} = 14.25\,\%$$

2.5.2 - Potencia efectiva específica del sistema térmico.

$$N_{ef} = \frac{Qa'}{60 \cdot w_o \cdot t_{ef}} = \frac{1}{60 \cdot w_o} \cdot \left[\frac{w_o \cdot C_{pa}\left(T_f - T_o\right)}{t_e} + \frac{\left(w_o - w_f\right)}{t_{per}} \cdot \nu \right], \; {kW}/{kg} \qquad \text{(ec.2.11)}$$

2.5.3 - Tiempo efectivo de aprovechamiento del fogón, (min).

$$t_{ef} = t_e + t_{per} \qquad \text{(ec.2.12)}$$

Donde:

$t_e \Rightarrow$ Tiempo en que el agua alcanza la temperatura de ebullición, 373K.

t_e = 50min.

$t_{per} \Rightarrow$ Tiempo en que el agua permanece en la temperatura de 373K.

$t_{per} = 5h = 300\,\text{min} \Rightarrow$ Hasta la cocción del alimento.

$t_{per} = 6h : 45\,\text{min} = 405\,\text{min} \Rightarrow$ Hasta que el agua permanece ebullendo, (terminación de la energía del combustible).

Potencia efectiva del sistema térmico, hasta la cocción del alimento ecuación (2.11).

$$N_{ef} = \frac{1}{60 \cdot 50} \cdot \left[\frac{50 \cdot 4.18(373 - 300)}{50} + \frac{(50 - 14.85)}{300} \cdot 2253.02 \right]$$

$$N_{ef} = 0.1897 \, {kW}/{kg}$$

Potencia efectiva del sistema térmico, hasta la terminación de la energía del combustible ecuación (2.11).

$$N_{ef} = \frac{1}{60 \cdot 50} \cdot \left[\frac{50 \cdot 4.18\,(373 - 300)}{50} + \frac{(50 - 2.16)}{300} \cdot 2253.02 \right]$$

$$N_{ef} = 0.2215 \, {kW}/{kg}$$

2.5.4 - Masa de combustible necesaria para la cocción del alimento.

$$w_{nec\,comb} = \frac{w_a \cdot Q'_a}{Q'_{cb} \cdot \eta'_{sc}} = \frac{50 \cdot 1889 \ .01}{13264 \ .39 \cdot 0.1425} = 50 \, .86 \, kg \qquad \text{(ec.2.13)}$$

2.5.5 - Potencia necesaria del combustible.

$$N_{disponible} = \frac{Q'_{cb} \cdot 10^{-3} \cdot w_{nec_{comb}}}{3.6 \cdot t_{cocción}} = \frac{13264.39 \cdot 10^{-3} \cdot 65}{3.6 \cdot 5} \qquad \text{(ec.2.14)}$$

$$N_{disponible} = 47.899 kW$$

2.5.6 - Energía disponible en la hornilla.

$$E_{disponible} = N_{disponible} \cdot t_{ef}$$
$$E_{disponible} = 47.899 \cdot 5.83$$
$$E_{disponible} = 279.25kW - h \quad \text{(ec.2.15)}$$

Tiempo efectivo hasta la cocción del alimento ecuación (2.13).

$$t_{ef} = 50 + 300$$
$$t_{ef} = 350\,\text{min} = 5.83h$$

Conclusiones parciales

1- El suministro excesivo de aire de alimentación al combustible, contribuye a la baja eficiencia del sistema térmico producto que la convención del combustible se produce en dirección de la corriente de aire (Horizontal) que abandonan rápidamente la cámara de combustión con los gases de salida, (inquemados gaseosos).

2- La cámara de combustión es excesivamente grande, puesto que abarca toda la longitud del fogón y su sección prismática no varía en esa longitud, lo que trae como consecuencia un gasto excesivo de combustible (Leña), para la cocción de alimentos.

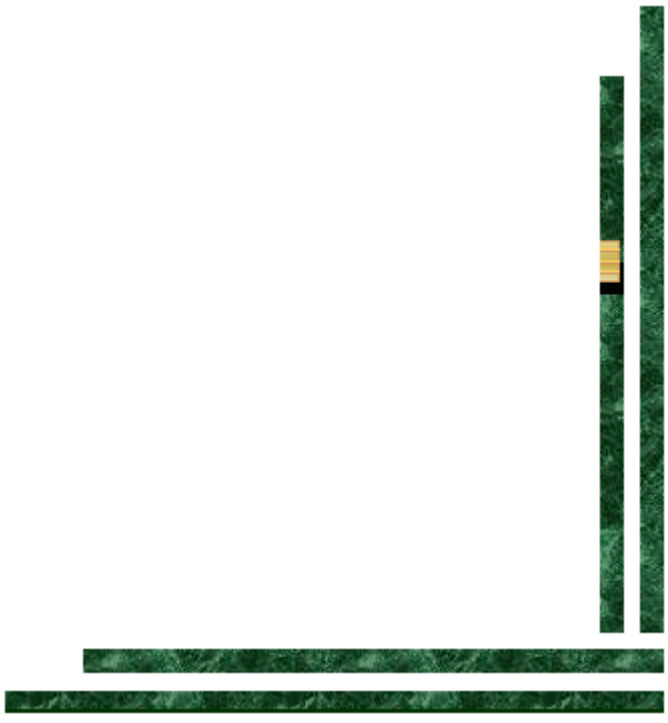
3- No existe un control de la salida de los gases de combustión por la chimenea, los cuales abandonan la cámara a una velocidad muy alta y esto provoca una deficiente recuperación del calor (Elevada temperatura de los gases de la combustión a la salida por la chimenea).

4- No existe una adecuada organización del combustible en la cámara de combustión, así como de la forma de cocción de los alimentos.

5- Se demostró que solo con una masa de 50.86kg de leña es suficiente para lograr la cocción de los alimentos que mayor tiempo de cocción requieren.

6- Una eficiencia del 14.25% es muy baja para un fogón de esta característica.

CAPÍTULO 3



CAPÍTULO III: Metodología de Diseño de Fogones Gasificadores de Biomasas, utilizando el principio de la macro multitubularidad natural o provocada, en la combustión de lecho fijo de capa gruesa.

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 biomasas.

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

Los combustibles sólidos al igual que los líquidos, se agrupan por sus cualidades y ello responde en primer lugar, a la facilidad de los mismos de gasificarse y en segundo lugar, a su capacidad de dar respuesta a los requisitos de la combustión, según la aplicación específica. Cuando un combustible líquido se considera pesado, se refiere a un combustible con dificultades en gasificar, con un bajo índice de inflamación (Elevado tiempo de ignición), lo que hace necesario el precalentamiento para su garantía, además de requisitos adicionales, vinculados a una compleja y costosa tecnología para el aseguramiento aceptable de la combustión. Los combustibles sólidos y en particular los que provienen de las biomasas residuales no leñosas no son ajenos a las dificultades precedentes, sobre todo cuando se queman en pila de capa gruesa o en forma de briquetas macizas de medianas y grandes dimensiones y altas densidades, en hornos térmicamente ineficientes, donde las temperaturas del ambiente de combustión resultan inferiores a 700^0C.

Todos los factores vinculados a un combustible sólido que aseguren la inflamación del mismo en el mínimo tiempo posible, con independencia de las condiciones de combustión, con elevada potencia y energía térmica, contribuyen a caracterizarlo desde el punto de vista de su calidad como tal, será de peor calidad, el que no satisfaga estos requisitos. Cuando se utiliza en una aplicación combustible de baja calidad, desde el punto de vista de la combustión, ello presupone gastos adicionales en la preparación del mismo y en la tecnología de combustión, para asegurar una combustión con aceptables índices. Los experimentos con biomasas residuales leñosas y no leñosas densificadas en forma de briquetas tubulares y multitubulares, en la combustión en pila de capa gruesa. Infante, Cesar (2010:60), demostraron que la macro multitubularidad es la garantía de la gasificación de dichos combustibles sólidos, con independencia de las dimensiones geométricas y de la densidad. Para la valoración cualitativa de un

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

3.3- DISEÑO DE EXPERIMENTOS PARA DETERMINAR LA INFLUENCIA DE LA TUBULARIDAD Y MULTITUBULARIDAD DE LAS BRIQUETAS DE DIFERENTES BIOMASAS, EN LOS ÍNDICES FUNDAMENTALES DE COMBUSTIÓN, QUE POSIBILITAN CARACTERIZAR LA CALIDAD TÉRMICA DE LAS MISMAS.

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

El factor que designa específicamente la tubularidad equivalente de las briquetas (Relación del espesor de la briqueta al diámetro equivalente de sus conductos $\beta = \frac{\delta}{d}$), no se analiza directamente, su influencia indirecta se determina por el factor independiente (λ_{eq}), (β= (1- λ_{eq})/2. λ_{eq}). Lo que demuestra como disminuye con el incremento de (λ_{eq}).

Tabla 3.1 Factores independientes y sus niveles experimentales.

Nivel	Z	λ_{eq}	ρ_0 (kg/m^3)	ρ (kg/m^3)
-1	1	0,3	25	500
1	5	0,5	120	1000

Z	d (mm)	λ_{eq}	β
1	30	0,3	1,16
1	50	0,5	0,5
5	15	0,3	1,16
5	25	0,5	0,5

Tabla 3.2 Matriz de diseño de experimentos factoriales completos 2^4.

N_0	λ_{eq}	Z	ρ_0 (kg/m^3)	ρ (kg/m^3)	K min^{-1}	ICP g/min	Nb kW/kg	Tig. min	η_{SC} %
1	-1	-1	-1	-1	0,021	4,35	1,94	15	44,0
2	1	-1	-1	-1	0,036	7,96	2,74	3	45,0
3	-1	1	-1	-1	0,041	12,70	2,57	5	41,5
4	1	1	-1	-1	0,045	13,75	3,09	2	49,7
5	-1	-1	1	-1	0,041	7,62	1,86	10	46,5
6	1	-1	1	-1	0,048	7,49	2,57	3	43,0
7	-1	1	1	-1	0,062	10,48	2,27	4	40,5
8	1	1	1	-1	0,054	11,50	2,77	2	48,9
9	-1	-1	-1	1	0,023	4,32	1,90	20	45,0
10	1	-1	-1	1	0,038	11,35	2,86	3	43,0
11	-1	1	-1	1	0,044	13,62	2,61	4	42,3
12	1	1	-1	1	0,048	14,73	3,15	2	51,6
13	-1	-1	1	1	0,044	8,76	1,88	12	45,0
14	1	-1	1	1	0,053	10,20	2,61	3	42,3
15	-1	1	1	1	0,070	10,48	2,31	5	40,0
16	1	1	1	1	0,065	13,06	2,79	2	49,5

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

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

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

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

R^2=82; E=0, 006

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

R^2=70; E=3,21

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

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

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

R^2=72; E=3,20

3.3.2 - Análisis de los resultados.

En las correlaciones obtenidas se puede observar que la influencia de la densidad de las briquetas no es significativa, lo que resulta de gran ventaja, por cuanto las exigencias en la densificación no constituyen limitante para que las briquetas funcionen bien en la combustión, incluso en condiciones naturales de las biomasas (Sin densificar), siempre que se asegure la macro multitubularidad en la pila dentro del horno. Infante, Cesar (2010:65). El tipo de biomasa (Leñosa o no leñosa), influye de forma significativa, en la velocidad específica de la reacción de combustión (k) y en la potencia media aportada por el combustible (Nb), en el primer índice, las biomasas leñosas presentan mayor velocidad de reacción que las no leñosas y lo contrario ocurre en el segundo. En todas las correlaciones, excepto la correspondiente a la reactividad específica (k) aparece la relación (λ_{eq}) como el factor independiente de mayor significación y coincide en todos los casos, que las magnitudes más favorables de los diferentes factores de respuestas están asociadas con el incremento de dicha relación (λ_{eq}). El incremento del número de conductos (z) de las briquetas, influye de forma significativa en todos los índices que utilizan las briquetas de forma individual, tal es el

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

En la figura 3.1 Se muestra el comportamiento del índice de combustión promedio (ICP) en briquetas tubulares y multitubulares de aserrín de madera y paja de caña, con relaciones (λ_{eq}) próximas a las del diseño precedente.

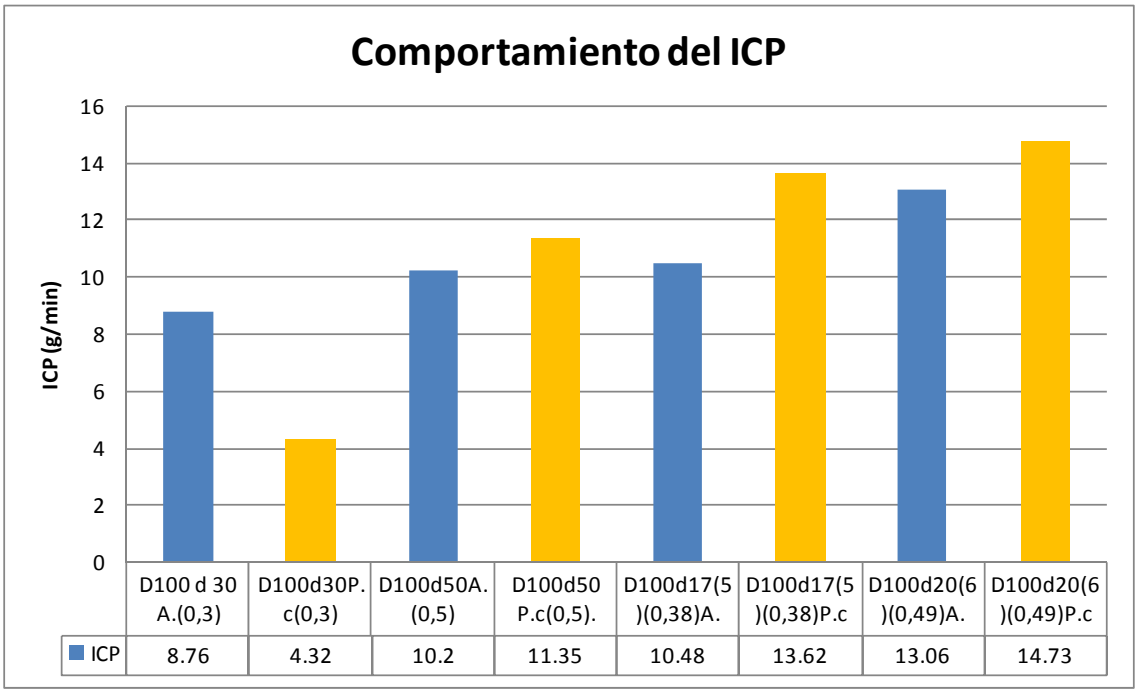


Fig. 3.1 Comportamiento del índice de combustión promedio (ICP) en los distintos tipos de briquetas analizadas. A: Aserrín de madera, Pc: Paja de caña.

En la figura 3.2 Se muestra el comportamiento gráfico del índice de combustión promedio (ICP) y la potencia disipada por la combustión de una masa determinada de briquetas en un horno, puede apreciarse la correspondencia entre ambos factores.

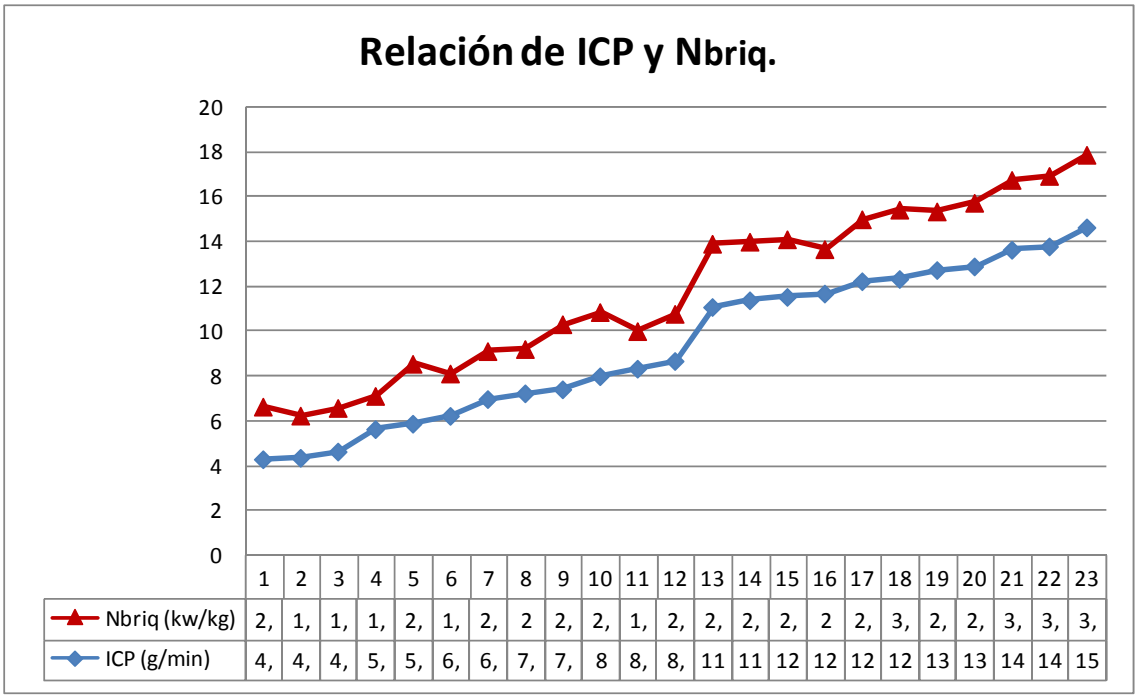


Fig. 3.2 Relación del comportamiento del ICP y N_{briq} en diferentes briquetas tubulares o multitubulares elegidas al azar, buscando desde los valores inferiores de ICP a los superiores y su correspondiente comportamiento en la potencia disipada Nb.

3.4- ÍNDICE DE TRANSFORMACIÓN DE LAS BIOMASAS O GRADO DE TRANSFORMACIÓN DE LAS BIOMASAS EN BIOGÁS, DURANTE EL PROCESO DE GASIFICACIÓN.

3.4.1 Gasificación de las biomasas en la combustión en lecho fijo de capa gruesa con macro multitubularidad provocada.

En el epígrafe 3.3 se demostró experimentalmente que la esencia del proceso de gasificación quedaba determinada por la multitubularidad de la masa del combustible en el interior de una cámara de combustión, y como factor determinante en el comportamiento de los índices fundamentales resultó la relación equivalente de diámetros (λ_{eq}), este factor representa la multitubularidad, por cuanto en el volumen de combustible sólido, existirá un conveniente número de conductos de dimensiones

medibles o no, que satisfagan la magnitud del factor (λ_{eq}) , nunca inferior al 30% y ello asegura que la distancia relativa entre los mismos ($\beta<2$), posibiliten un proceso de gasificación espontáneo y semejante al que ocurre en la naturaleza, para este propósito, se debe provocar la macro multitubularidad, ya sea por la organización del combustible sólido en la pila dentro de la cámara de combustión (Leña, carbón, briquetas macizas o multitubulares) o por la creación artificial de dispositivos de gasificación que conectados con la parrilla del combustible, aseguran la macro mutitubularidad 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 biomasas, con elevados valores de los índices fundamentales de combustión.

3.4.2 Determinación del índice de transformación de las biomasas en el proceso de gasificación (ψ).

En el experimento realizado. Fundora Acea, Irving (2009:110), se determinó el índice de combustión promedio (ICP) en briquetas tubulares y multitubulares de aserrín de madera y otras biomasas no leñosas, utilizando una balanza de precisión para medir la masa media de las briquetas en combustión-gasificación, para intervalos de tiempos determinados, hasta que las biomasas constituyentes se transformaron en cenizas. El resultado de este proceso es la característica de comportamiento de las briquetas de una biomasa dada y con una geometría determinada durante el tiempo de la gasificación-combustión. No obstante es obvio, que las condiciones para este experimento no son las más adecuadas (Fuera de Cámara) para la garantía de una combustión eficiente. Sin embargo fue un interés, la combustión con llamas de las briquetas y las consideraciones importantes se centraron en los valores de (ICP) y el tiempo transcurrido en la combustión (Proceso de Gasificación). Por cuanto el índice de transformación de las biomasas 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.

$$\psi = \frac{w_0 - w_f}{w_0} = \left(1 - \frac{w_f}{w_0}\right) \qquad \text{(ec.3.1)}$$

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 3.3 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.

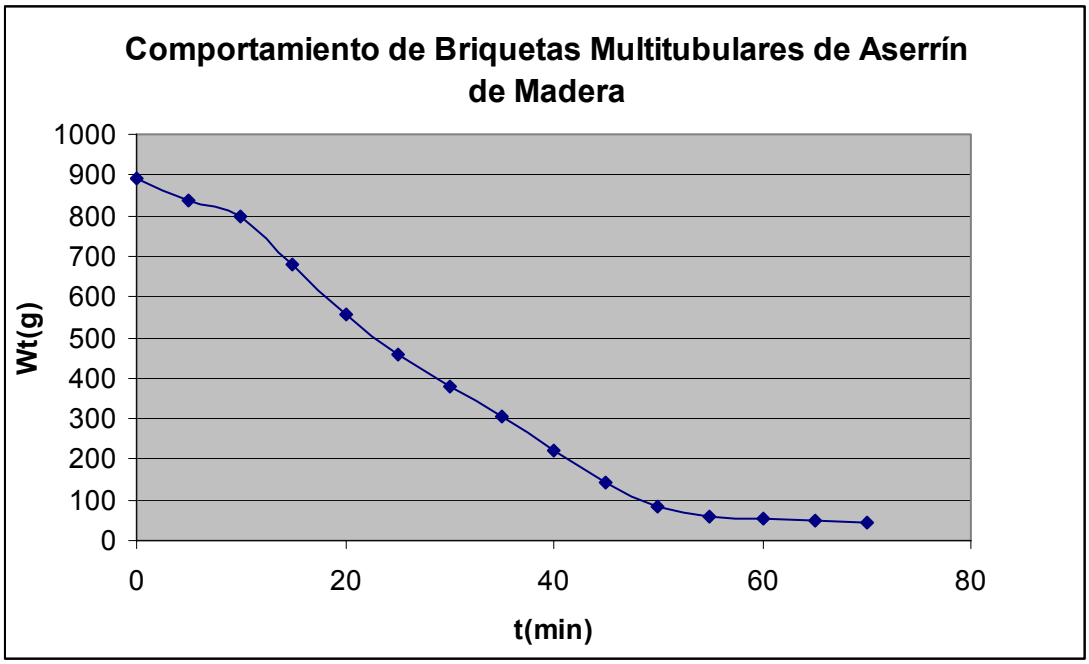


Fig. 3.3 Característica de comportamiento de la briqueta multitubular de aserrín de madera con 12% de humedad, densidad, ρ=550 kg/m^3, diámetro exterior D=100mm y masa w_0= 890g.

La característica de comportamiento mostrada en la figura 3.3 puede ser representada por un modelo físico matemático de la forma siguiente:

$$w_t = b_0 + b_1 \cdot e^{-c_1 \cdot t} \qquad \text{(ec.3.2)}$$

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).

$$L_n\left(w_t - b_0\right) = l_n b_1 - c_1 \cdot t \qquad \text{(ec.3.3)}$$

Equivalente a la ecuación lineal.

$$y = A + B \cdot X \qquad \text{(ec.3.4)}$$

Donde:

$A = L_n b_1$

$B = -c_1$

Derivando la ecuación (3.2).

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

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

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.

$$\Delta W = \int_{t_1}^{t_2} V_g \cdot dt \qquad \text{(ec.3.6)}$$

T_1 = 5min (Tiempo medio necesario para la ignición del combustible).

$T_2 \Rightarrow$ Se obtiene de la ecuación (3.5) y de los experimentos realizados por. Fundora Acea, Irving (2009:110), donde se considera que valores de $v_g \leq 3 g/\min$, finaliza la combustión con llamas y el aporte energético del carbón libre de las briquetas no tiene importancia energética.

$$v_g = 3.5 \, g/\min$$

$$3.5 = -b_1 \cdot c_1 \cdot e^{-c_1 \cdot t_2} \qquad \text{(ec.3.7)}$$

Linealizando la ecuación (3.5)

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

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

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

$$|\Delta w| = b_1 \cdot e^{-c_1 \cdot t} \Big/_5^{\frac{Ln\left(\frac{3.5}{b_1 \cdot c_1}\right)}{c_1}} \qquad \text{(ec.3.8)}$$

$$\psi = \frac{|\Delta w|}{w_0} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} vg \cdot dt}{w_0} \qquad \text{(ec.3.9)}$$

De la evaluación de la ecuación (3.2) para diferentes valores de (w_t) y del tiempo (t) se obtienen los valores de (c_1) para briquetas de diferentes relaciones de diámetros y diferentes biomasas.

En la tabla 3.3 Se exponen los valores de c_1 para diferentes relaciones $\left(\frac{d}{D}eq\right)$.

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

Utilizando regresión lineal simple.

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

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

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

En la tabla 3.4 Se muestran los valores de ψ para briquetas de biomasas 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 (Madera)	0.3	990	0.053	106	756	101	7.5	0.75
	0.5	990	0.086	66	640	61	10.6	0.64

Si en el proceso de combustión-gasificación se utiliza leña, briquetas macizas o tubulares, como combustible, es importante determinar $\frac{d}{D}eq$ y dependiendo del tipo de biomasa, utilizar la ecuación de c_1 correspondiente; (En el caso de la leña se puede emplear la ecuación de c_1 que caracteriza al aserrín de madera con, $\frac{d}{D}eq \approx \frac{A_{gasif}}{A_{parrilla}}$).

Donde:

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

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

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

Donde:

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

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

Ecuación para leña y briquetas macizas.

$$V_{gasif_1} = \left(V_{cámara} - V_{comb.}\right) \qquad \text{(ec.3.11)}$$

Donde:

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

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

Donde

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

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

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

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

$$A_{gasf.Perimetral} = \sqrt{\frac{4 \cdot A_{gasif}}{\pi}} \cdot \pi \cdot H_{cámara} \text{ , (m}^2\text{)} \qquad \text{(ec.3.12)}$$

Donde:

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

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

$$V_{gasif_2} = \left(V_{cámara} - V_{comb.}\right) + V_{cond.} \text{ , (m}^3\text{)} \qquad \text{(ec.3.13)}$$

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

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

Cuando las biomasas son sin densificar, se requiere provocar la multitubularidad, mediante el empleo de gasificadores distribuidos convenientemente en la sección transversal de la parrilla, lo que asegura la relación ($\frac{d}{D} eq$). Sin embargo se ha demostrado experimentalmente que el índice de combustión promedio (ICP) así como la intensidad de la gasificación (V_g) dependen de las dimensiones de la cámara de combustión, así como del área perimetral de cada gasificador o conducto de gasificación, fundamentalmente de este último. Infante, Cesar (2010:60).

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

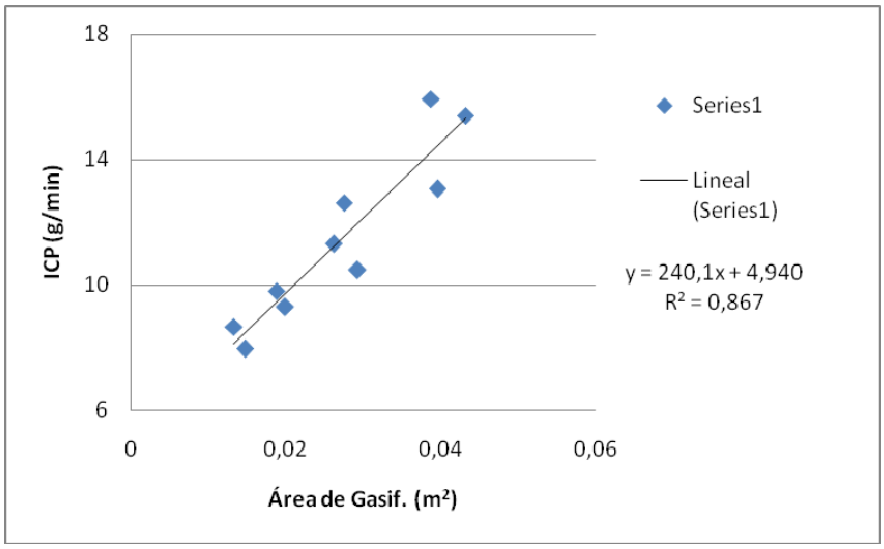
Donde:

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

$z \Rightarrow$ Número de gasificadores.

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

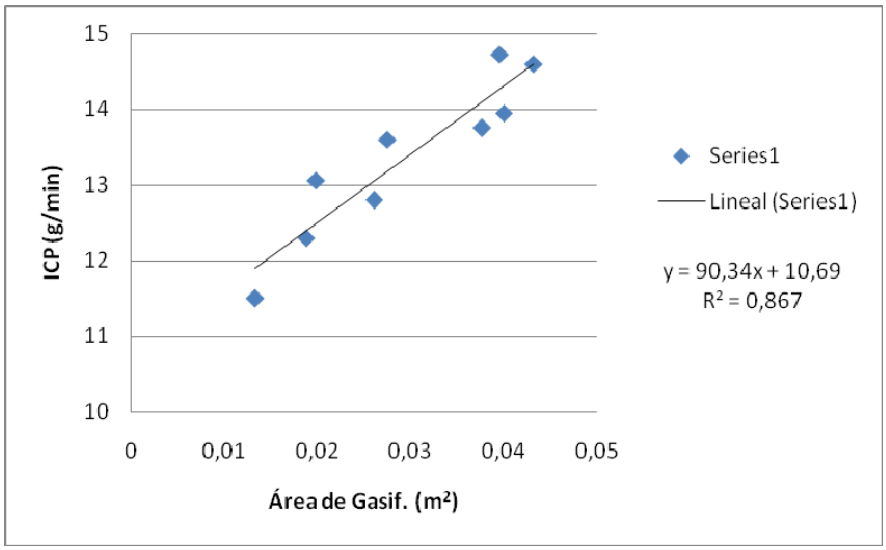
En la figura 3.4 Se muestra el experimento realizado con Cáscara de Café, con briquetas multitubulares, Infante, Cesar (2010:65), se denota una correspondencia lineal entre el índice de combustión promedio (ICP) y el $A_{gasif.perim}$ del gasificador.



La figura 3.4 Muestra la característica de comportamiento entre el ICP y el A_{prim} del gasificador.

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

En la figura 3.5 Se muestra el experimento realizado con Aserrín de Madera, con briquetas multitubulares, Infante, Cesar (2010:65), se denota una correspondencia lineal entre el índice de combustión promedio (ICP) y el $A_{gasif.perim}$, del gasificador



La figura 3.5 Muestra la característica de comportamiento entre el ICP y el A_{perim} del gasificador.

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

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.

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

$$ICP = \frac{|\Delta w|}{\Delta t} = \frac{\psi \cdot w_{total}}{\Delta t} \qquad \text{(ec.3.17)}$$

$$\Delta t = t_2 - t_1$$

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

Donde:

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

$$b_1 = \left(w_t - b_0\right)$$

Determinación de la energía del proceso de gasificación.

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

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.

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

Potencia térmica del proceso de gasificación.

$$N_{gasif} = 0.06 \cdot V_g \cdot ICP \quad \text{, (kJ/h)} \qquad \text{(ec.3.19)}$$

$$N_{gasif} = 1.66 \cdot 10^{-5} \cdot V_g \cdot ICP \quad \text{, (kW)} \qquad \text{(ec.3.20)}$$

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).

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

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

Área de gasificación perimetral del gasificador.

$$A_{gasif.perim} = z_1 \cdot \pi \cdot d_{gasif} \cdot H_{gasif} \quad \text{, (m}^2\text{)} \qquad \text{(ec.3.21)}$$

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:

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

Despejando la ecuación (3.20).

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

Donde:

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

Para biomasas no leñosas (Cáscara de Café).

$$A_{gasif.perim} = \frac{ICP - 10.69}{90.31} \quad \text{, (m}^2\text{)} \qquad \text{(ec.3.22)}$$

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

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

Y se dispone del diámetro de la cámara de combustión.

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

Como el área de gasificación perimetral.

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

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

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

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

Volviendo al área de gasificación perimetral inicial.

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

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).

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

$$w_t = \rho_0 \cdot V_{ef} \qquad \text{(ec.3.23)}$$

Donde:

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

$\rho_0 \Rightarrow$ Densidad aparente del combustible utilizado, (kg/m^3).

$V_{ef} \Rightarrow$ Volumen efectivo para el combustible, (m^3).

$$V_{ef} = \frac{\pi \cdot D^2}{4}\left[1 - z_1\left(\frac{d}{D}\right)^2\right] \cdot H_{gasif} \qquad \text{(ec.3.24)}$$

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, que demostraron que la relación del área de alimentación de aire secundario respecto al área de los gasificadores. Infante, Cesar. (2010:60).

$$\delta = \frac{A_{secund.}}{A_{gasif}} \qquad \text{(ec.3.25)}$$

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

Experimentalmente se demostró que a partir de δ = 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.

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

3.5.1 - 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.

3.5.2 - Forma geométrica de la Cámara de Combustión.

1. Prismática.
2. Cilíndrica.

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

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

Los resultados de investigaciones experimentales, muestran los rangos más aceptables de las relaciones entre el aire secundario y los gases combustibles, referirse a la ecuación (3.25). Infante, Cesar (2010:63).

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

Resultados de investigaciones experimentales precedentes, demostraron en briquetas tubulares y multitubulares que la relación entre el área de gasificación (A_{gasif}) y el área de la sección exterior de la briqueta ($A_{cám}$), $\lambda_{eq} = \frac{A_{gasift}}{A_{cám}} = (0.3 : 0.7)$. Esta condición supone

una independencia entre el aire primario (Aire para la gasificación) y el aire secundario (Aire para la combustión de los gases de la gasificación). Fundora Acea, Irving (2009:110).

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 $\lambda_{eq} = \frac{A_{gasift}}{A_{cám}}$, 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 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.

$$H_{cám} = H_{comb} + H_{vacío} + H_{olla} \qquad \text{(ec.3.26)}$$

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

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.

$$A_{gasif} = (0.3 : 0.7) \cdot A_{cám} \qquad \text{(ec.3.27)}$$

$$A_{cond} \leq 0.20 \cdot A_{gasif} \qquad \text{(ec.3.28)}$$

Existe la otra alternativa, donde el suministro de aire de alimentación se distribuye como aire primario a la gasificación y aire secundario a la combustión de los gases generados en el proceso de gasificación. Esta alternativa debe combinar la relación, $\delta = \frac{A_{secund}}{A_{gasif}} = (0.85:2)$ y la relación $\lambda_{eq} = \frac{A_{gasift}}{A_{cám}} = (0.3:0.7)$.

En las figuras 3.6 y 3.7, se muestran distintos tipos de gasificadores.

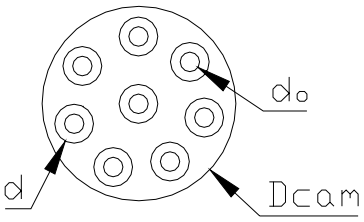


Figura 3.6

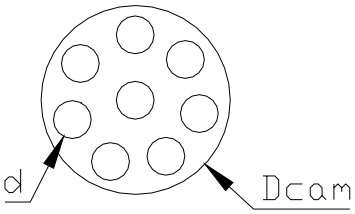


Figura 3.7

Para la figura (3.6), se utiliza la siguiente ecuación.

$$A_t = A_{gasif} + A_{secund} \qquad \text{(ec.3.29)}$$

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

Donde:

$d \Rightarrow$ Diámetro del conducto de gasificación.

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

Para el caso de la figura (3.7) se utiliza la siguiente ecuación.

$$A_t = A_{gasif} = \frac{z \cdot \pi \cdot d^2}{4} \quad , (m^2) \qquad \text{(ec.3.30)}$$

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

$$A_{cám} = \frac{\pi \cdot D_{cám}^2}{4} \quad , (m^2) \qquad \text{(ec.3.31)}$$

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

$$A_{cám} = L \cdot A \ , (m^2) \qquad \text{(ec.3.32)}$$

La variante (fig.3.6) 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 ($\lambda = \frac{A_t}{A_{comb}}$) y $\delta = \frac{A_{secund}}{A_{gasif}}$.

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

3.5.3 - 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.

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

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

$$H_{vacío} \geq 0.6 \cdot H_{comb}$$

6- La altura de los gasificadores debe ser igual o superior a la altura del combustible.

7- El área del conducto de aire de alimentación debe ser igual o inferior al 20% del área total de circulación de aire en la cámara de combustión (A_t).

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

8- La cámara de combustión puede ser metálica con aislamiento refractario (Lana de vidrio o Arcilla) o puede ser de refractario completamente, con las hornillas (Hendidas o Planas) metálicas.

9- La leña en trozos o las briquetas de biomasas residuales, no superiores a 150mm de longitud y diámetros inferiores a 120mm.

3.6 - DISEÑO DEL FOGÓN GASIFICADOR.

3.6.1 - Principio de la macro multitubularidad.

El diseño de un fogón con el principio de la macro 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 $\delta = \frac{A_{secund}}{A_{gasif}} = (0.85:2)$.

$\lambda = 1 \qquad z = (4:9)$

$$\lambda = \frac{d}{D} eq = \sqrt{z}\,\frac{d}{D} = (0.3:0.7)$$

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

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

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

Donde:

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

$3 \le z \le 9$

3.6.2 - Ejemplo de cálculo.

1 - Asumir preliminarmente

z_1=5 – Número de gasificadores.

d=100mm – Diámetro del gasificador.

d_0=60mm – Diámetro del conducto de aire secundario.

D=560mm – Diámetro de la cámara.

2 - Determinar, $\left(\delta = \frac{A_{secund}}{A_{gasif}}\right)$ $0.85 \leq \delta \leq 2$

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

$$A_{secund} = \frac{\pi \cdot 0.06^2}{4} \cdot 5$$

$$A_{secund} = 0.01414\, m^2$$

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

$$A_{gasif} = \frac{\pi \cdot 0.1^2}{4}\left[1 - \left(\frac{0.06}{0.1}\right)^2\right] \cdot 5$$

$$A_{gasif} = 0.02513\, m^2$$

$$\delta_{calculado} = 0.56 < \delta_{mín} = 0.85$$

3 - Asumir $\delta = 1$

$A_{secund} = A_{gasif}$

$A_{secund} = 0.02513 m^2$

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.

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

$$A_{dif} = 0.02513 - 0.01414$$

$$A_{dif} = 0.01099\, m^2$$

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 = 560mm

$$\lambda_{eq} = \sqrt{5} \cdot \frac{100}{560} = 0.35$$

$$\lambda_{eq} = 0.40 > \lambda_{eq_{mín}} = 0.3$$

6 - Determinación de la altura del fogón.

$H_{máx}$ = 880mm

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

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

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

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

$H_{vacío}$ = 140mm $\Rightarrow$ 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 65x240mm

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

Determinar la masa de combustible en la cámara de combustión.

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

$$A_{efc} = \frac{\pi \cdot 0.560^2}{4} - \left[\frac{\pi \cdot 0.1^2}{4} \cdot 5 + \frac{\pi \cdot 0.06^2}{4} \cdot 4 \right]$$

$$A_{efc} = 0.1957\ m^2$$

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.

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

$$w_{comb} = 250 \cdot 0.043$$

$$w_{comb} = 10.75\ kg$$

8 - Con $\left(\lambda_{eq} = \frac{d}{D} eq = 0.4\right)$ determinar el coeficiente de transformación de la biomasa (ψ). En la tabla 3.4 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).

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

$$E_{comb} = 3733 \cdot 7.84$$

$$E_{comb} = 29266.72\ kJ$$

Donde:

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

11 - Determinación de la Potencia Media.

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

$$N_{gasif} = 0.06 \cdot 3733 \cdot 42$$

$$N_{gasif} = 9407.16\ {kJ}/{kg} = 2.61\ kW$$

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

$$ICP = 90.31 \cdot 0.345 + 10.69$$

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

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

$$A_{gasif.perim} = 5 \cdot \pi \cdot 0.1 \cdot 0.22$$

$$A_{gasif.perim} = 0.345\ m^2$$

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.

$$A_{a\lim} \leq \left(A_{gasif} + A_{secund}\right) \cdot 0.2$$

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

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

$$A_t = 2 \cdot 0.02513$$

$$A_t = 0.05026\ m^2$$

$$A_{a\lim} \leq 0.01\ m^2$$

$$\frac{\pi \cdot d_a^2}{4} \leq 0.01$$

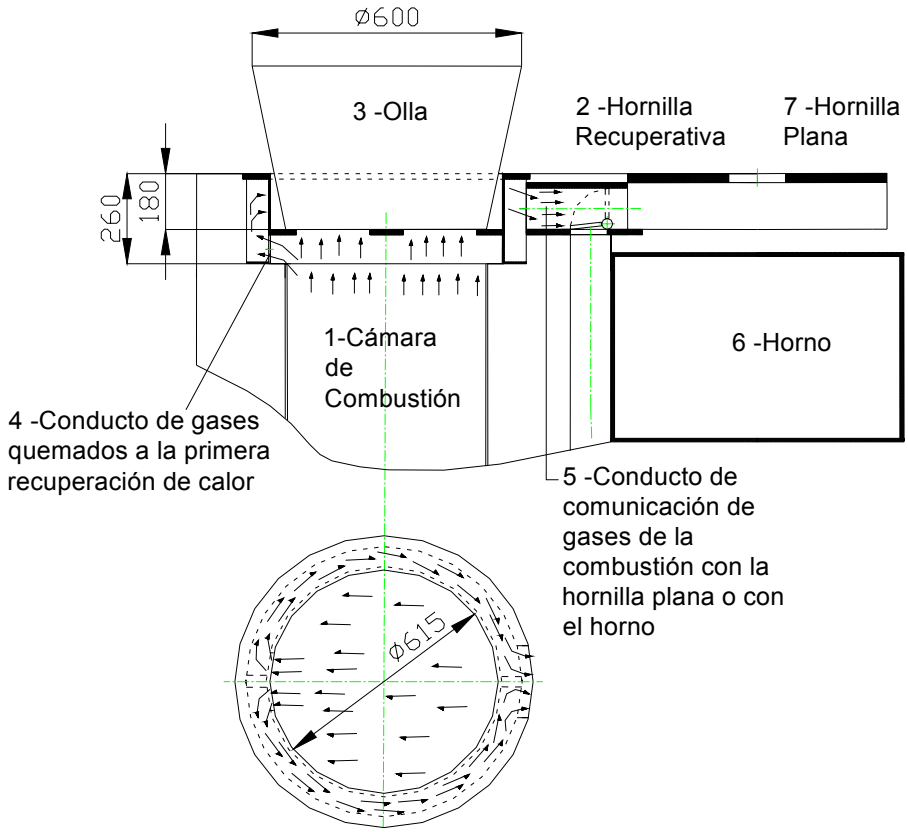
$$d_a \leq \sqrt{\frac{4 \cdot 0.01}{\pi}}$$

$$d_a \leq 113\ mm$$

$$d_a = 100\ mm$$

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 3.8 Muestra las dimensiones de la Hornilla Recuperativa.



El diámetro interior de la hornilla es de 615mm, para asimilar la mayor olla de 600mm de diámetro. La olla penetra 180mm quedando 80mm por debajo del fondo de la olla para un conducto de 70mm de altura por 200mm de ancho circunferencial que asegura la evacuación de los gases del fondo de la olla al conducto que circunvala la hornilla, formado entre esta y el refractario del fogón cuya magnitud es de 65 x 340mm 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 0.014m^2.

15 - Considerar un área de evacuación en todos los elementos del fogón igual o superior al área del conducto principal de alimentación de aire ($A_{conducto}$=0.01m^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 180º la hornilla respecto a la posición indicada en la figura (3.8).

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.

3.7 - FACILIDADES DEL FOGÓN DISEÑADO.

1- Ahorro considerable de componentes metálicos en su estructura principal.

a) 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).

b) Se utilizarán planchas de acero para las hornillas recuperativas y para el horno, la parrilla será concebida de cabillas de acero. La utilización de materiales metálicos, puede ser reducida al mínimo posible (Fogón Rústico).

2- Posibilidad del uso de cualquier combustible sólido, con elevados índices de eficiencia en la combustión.

El principio de la multitubularidad provocada asegura el proceso de gasificación espontáneo y natural, que es la garantía del funcionamiento invariable 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.).

3- Elevada eficiencia térmica de la instalación y del sistema térmico.
   a) Aislamiento adecuado de la cámara de combustión.
   b) Utilización de las hornillas recuperativas (Hornilla Hendida).
   c) Recuperación del calor en la hornilla hendida, en la hornilla plana y en el horno.
   d) Organización adecuada del proceso de cocción de alimentos.
   e) Regulación del proceso de gasificación-combustión, según las exigencias de la aplicación (Regulación del aire de alimentación, regulación de la chimenea o ambos simultáneamente).

4- Facilidad de sustitución o transformación de:
   a) Parrilla del combustible.
   b) Hornilla recuperativa o plana.
   c) Conducto de distribución de gases de la combustión, a la hornilla plana o al horno.
   d) Puerta del horno, de alimentación de combustible y de evacuación de las cenizas.
   e) Chimenea.

3.8 - ESTRUCTURA Y FUNCIONAMIENTO DEL FOGÓN GASIFICADOR (FFUND: II 00 - 00 - PE).

3.8.1 – Estructura del Fogón Gasificador (FFUND: II 00 – 00 – PE).

El fogón gasificador en su versión actual 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 biomasas 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 180º 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).

7. 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.

8. 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).

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

   Construida de barras de acero de 20mm de diámetro, 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.

10. 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 en la cámara de combustión.

11. 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 orificios 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.

12. FFUND: II 00 - 03, Hornilla Plana.

13. FFUND: II 00 - 04, Chimenea de 160mm de diámetro interior y 7m de altura (Material de Aluminio).

14. FFUND: II 00 - 05, Tapa de cierre de la ventana para el combustible.
15. FFUND: II 00 - 06, Guía para tapa de cierre de la ventana para el combustible.
16. FFUND: II 00 - 07, Soporte de la Parrilla.
17. FFUND: II 00 - 08, Pasadores de la puerta del Cenicero.
18. FFUND: II 00 - 09, Orejas para la puerta del Cenicero.
19. FFUND: II 00 - 10, Orejas para la puerta del Horno.
20. FFUND: II 00 - 11, Pasadores para puerta del Horno.

3.9 - FUNCIONAMIENTO DEL FOGÓN GASIFICADOR (FFUND: II 00 – 00 – PE).

(VER PLANO DE ENSAMBLE DEL ANEXO).

1. Cargar de combustible sólido sobre la parrilla (14), hasta la altura de los gasificadores (2), y ello realizarlo por la parte superior de la hornilla recuperativa (4). El suministro complementario se realizará por el conducto de alimentación lateral que está cerrado por la placa de cierre (11).
2. Abrir la puerta del cenicero (17), y con una masa entre (40-60g) de combustible convencional iniciar la ignición del combustible sólido, para tal propósito utilice el piso del cenicero (Parte inferior de la parrilla (14), no sitúe la olla, hasta que la gasificación-combustión no se haya estabilizado, manipule aceptadamente la puerta (17), y el dispositivo de regulación del aire de alimentación para que la gasificación sea efectiva.
3. Situar la olla de mayor diámetro en la hornilla recuperativa, si el diámetro de la olla es inferior al correspondiente de la hornilla recuperativa, utilice una placa circular anular que se encarga de suplir el efecto deseado. Los gases calientes de la combustión cederán el calor por convección, al fondo de la olla y por radiación, cuando se mueven al salir de esta parte y dirigirse al dispositivo de evacuación distribución (6), a la hornilla plana o al horno. La primera recuperación del calor en la hornilla recuperativa hace que la energía de los gases de la combustión, sean útiles en la hornilla plana o en el horno, solo para mantener los alimentos.
4. Si se desea que la hornilla plana y/o el horno tengan un propósito diferente al precedente (Puedan ser utilizados en la cocción de alimentos o en el horneado

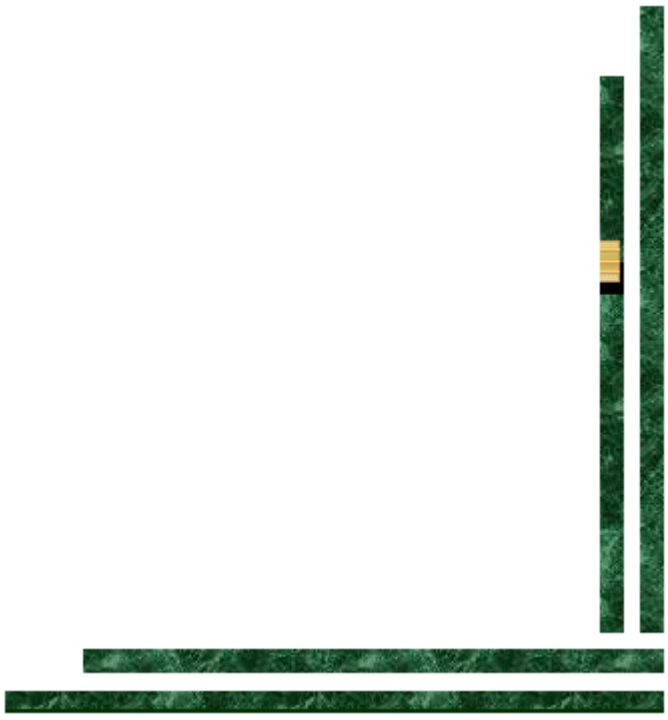
de estos), es necesario que la primera recuperación del calor, ocurra en esta zona, se requiere que el flujo de gases de la combustión no circunvalen la hornilla recuperativa (180^0 respecto a la posición mostrada en el plano) o remplazar la misma por una hornilla plana en la parte superior de la cámara de combustión.

5. La válvula de direccionamiento en el dispositivo de distribución de los gases de la combustión (6) se encarga, con su ubicación de proporcionar la energía requerida al horno (7) o a la hornilla plana (8), la válvula debe obstruir la comunicación con el horno (7) en ambas partes del fogón. Si se desea que sea la máxima energía a la hornilla plana (8) y cuando se requiera el funcionamiento simultaneo de la hornilla plana (8) y del horno (7), se establecerá la regulación correspondiente para satisfacer ambas demandas.
6. Después de estabilizar el régimen de funcionamiento del fogón se puede regular la magnitud de la potencia térmica del mismo, con la estrangulación del aire de alimentación, utilizando el dispositivo de regulación de la puerta del cenicero (17).
7. Cuando el combustible no es de pequeña granulometría, conviene organizarlo alrededor de los espacios dejados por los gasificadores, de forma que su multitubularidad quede asegurada. En caso de leña en trozos o briquetas macizas o tubulares puede prescindirse de los gasificadores (2), no obstante su presencia asegura el mejor funcionamiento del fogón, se convierten en conductos de aire secundario y los conductos de aire secundario (3) aseguran el oxígeno necesario y suficiente para la combustión generada en el proceso de intensa gasificación.

Conclusiones parciales

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

CAPÍTULO 4



CAPÍTULO IV: Costo de fabricación del Fogón Gasificador.

4.1 - GENERALIDADES DEL COSTO.

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

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

Los principales elementos del costo de producción expresado 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, que compensa los valores de los productos para sí.
d. La parte de los activos fijos tangibles que se transfieren en el producto en forma de depreciación.
e. El valor de la energía consumida.
f. Los gastos indirectos y otros gastos.

4.2 - COSTO DE MATERIALES.

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

En la fabricación del Fogón se utilizaron materiales auxiliares, cuyo precio fue necesario investigar en las entidades correspondientes. El costo de materiales fue determinado tomando en cuenta su precio de adquisición y la cantidad de unidades utilizadas.

Tabla 4.1 Listado de Materiales (Variante en Estudio I).

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

4.2.1 - Para horno de 400 x 500 x 350 con superficie superior metálica de Acero, espesor 8mm y hornillas planas en las tres posiciones.

Tabla 4.2 Listado de Materiales (Variante II).

DESIGNACIÓN	MATERIAL	UM	CUC	CANT.UTIL.	CUC
Plancha 8x1500x4500	Acero 20	T	378.00	0.08	30.19
Plancha 25x1500x4500	Acero 20	T	378.00	0.285	107.73
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	30	18.00
Bolsa de Cemento P-350	Cemento P-350	UN	5	2	10.00
Bolsa de Cemento Refractario	Cemento Refractario	UN	6	1	6.00
Costos Sub. - Total					313.28

4.2.2 - Sin horno, con parrilla esquelética en las cámaras de combustión y hornillas planas en su parte central.

Tabla 4.3 Listado de Materiales (Variante III).

DESIGNACIÓN	MATERIAL	UM	CUC	CANT.UTIL.	CUC
Plancha 8x1500x4500	Acero 20	T	378.00	0.08	30.19
Plancha 25x1500x4500	Acero 20	T	378.00	0.285	107.73
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
Bolsa de Cemento P-350	Cemento P-350	UN	5	2	10.00
Costos Sub. - Total					181.55

4.2.3 - Costos de materiales auxiliares.

Durante el proceso de soldadura se utilizaron:

Tabla 4.4 Costo de Electrodos.

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 oxigeno y el acetileno. La siguiente tabla refleja el costo por unidad y el total de estos materiales.

Tabla 4.5 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

4.3 - GASTO EN SALARIO.

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

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

Para determinar el gasto de salario se multiplicaron las tarifas horarias por las horas que debe trabajar cada obrero, dado el salario 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.

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

Tabla 4.6 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

4.4 - GASTO GENERADO POR LA AMORTIZACIÓN DE LOS EQUIPOS.

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

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

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

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

Costo de Amortización.

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

Tabla 4.7 Amortización de Equipos.

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

4.5 - COSTO POR EL CONSUMO DE ENERGÍA ELÉCTRICA.

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

Tabla 4.8 Gasto en Electricidad.

Costo kW-h = 0.09 CUC.

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

4.6 - TOTAL DE GASTOS DIRECTOS.

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

Gastos Directos = 441 + 38.16 + 34.63 = 513.79 CUC

Gastos Directos = 59.67 = 59.67 PESOS

4.7 - TOTAL DE GASTOS INDIRECTOS.

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

Gastos Indirectos = 0.3 x Gastos Directos = 0,3 x 513.79 = 154 CUC.

Gastos Indirectos = 0.3 x Gastos Directos = 0.3 x 59.67 = 17.9 PESOS.

4.8 - 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.

Tabla 4.9 Costo Total de Fabricación de las Diferentes Variantes en CUC.

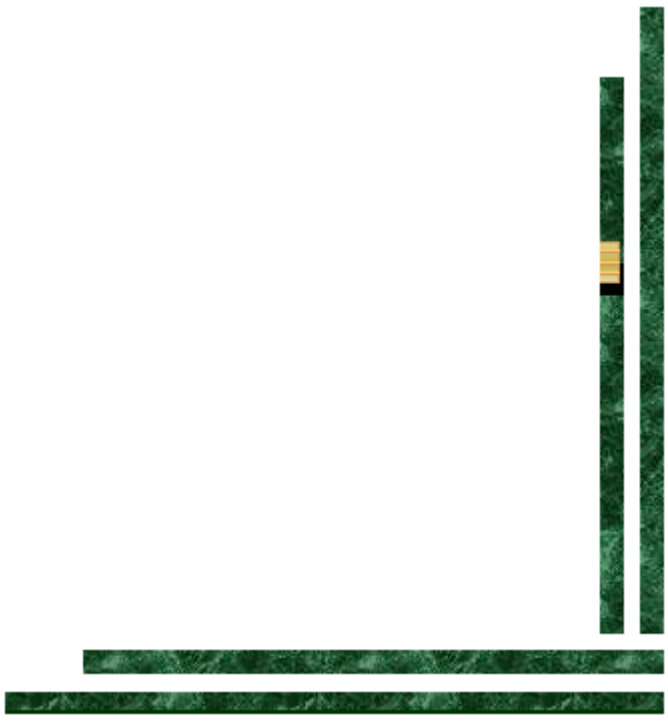
VARIANTES	CUC
Total Var. I	667.69
Total Var. II	550.3
Total Var. III	420.55

Como se puede apreciar el costo del Fogón Gasificador FFUND: II 00 - 00 PE esta entre (400 – 700) CUC. Si se emplean en su construcción materiales adquiridos en los lugares destinados a sus ventas. No obstante como lo fundamental para que esta tecnología funcione adecuadamente, se centra en la cámara de combustión, parrilla con gasificadores y hornillas. Los costos pueden ser reducidos (Fogón Rústico), utilizando materiales metálicos de desechos o chatarras, y materiales de construcción disponibles en el lugar de construcción.

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.

CONCLUSIONES

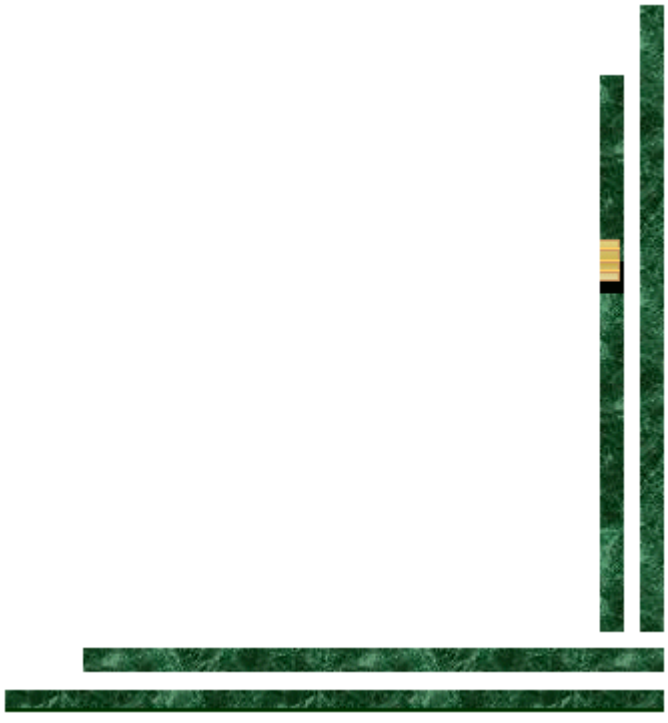


Conclusiones Generales

De los resultados obtenidos en el trabajo se pueden formular las conclusiones siguientes:

1. Utilizando la multitubularidad como principio básico de la naturaleza se desarrolló una metodología para diseñar fogones gasificadores de combustibles sólidos.
2. 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.
3. 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.
4. La posibilidad de uso de cualquier biomasa o combustible sólido, es la principal ventaja de dicho fogón.
5. Su bajo costo e impacto ambiental permiten asegurar que es una tecnología revolucionaria con un futuro asegurado.

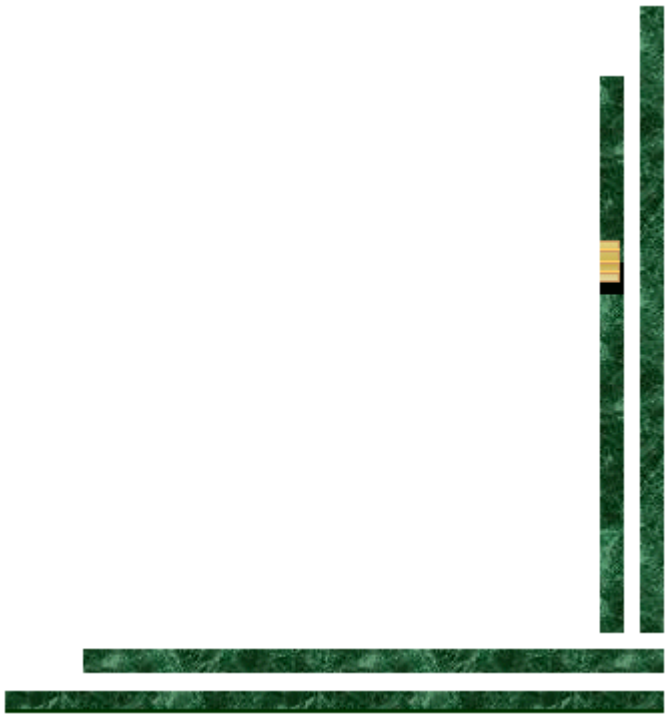
RECOMENDACIONES



Recomendaciones

1. Generalizar el uso de la metodología para el diseño de diferentes prototipos de fogones, 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.

BIBLIOGRAFÍA



Bibliografía

Abel Leyva, Frank y Fundora Beltrán, Pedro. (2002.). Construcción del fogón-gasificador para la investigación de combustión de sólidos. Trabajo de Diploma. UCF.

Asociación Europea para la Biomasa. Disponible. De: www.ecop.ucl.ac.be, Consultado 11 mayo 2011.

Asociación Española de Valorización. Energética de la Biomasa (AVEBIOM). Disponible en: www.avebiom.org, Consultado 12 mayo 2011.

Asociación para la Difusión del Aprovechamiento de la Biomasa en España (ADABE). Disponible en:www.adabe.net, Consultado 12 mayo 2011.

Borroto Nordelo, Aníbal. (2007). Combustión y Generación de Vapor. Universidad de Cienfuegos: Editorial Universo Sur.

Cápiro Chaviano, Yunier. (2002). Cálculo para la modificación del horno de la Empresa Procesadora de Café Eladio Machín de Cumanayagua a horno de capa cónica deslizante. Trabajo de Diploma. (En opción del título de Ingeniero Mecánico). Universidad de Cienfuegos.

Castro Ruz, Fidel. (2003) Discurso pronunciado por el Presidente del Consejo de Estado y de Ministro de la República de Cuba, en la XIII Conferencia de Jefes de Estado y de Gobierno del Movimiento de Países No Alineados, Kuala Lumpur, Malasia, Granma (La Habana): 6, 25 de febrero.

Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas. Disponible en: www.ciemat.es, Consultado 22 mayo 2011.

Centro Nacional de Energías Renovables (CENER). Disponible en: www.cener.com, Consultado 22 mayo 2011.

Fernández Conde, Emilio. (1994). Termodinámica Técnica., La Habana: Editorial Félix Varela.

Fundora Acea, Irving. (2009). Influencia de la geometría y la densidad de las briquetas cilíndricas tubulares y multitubulares de las biomasas, en los índices fundamentales de combustión.

Fundora Beltrán, Pedro (2003). Estudio del proceso de densificación gradual de la paja de caña, para el perfeccionamiento de su proceso tecnológico. Tesis en Opción de Ingeniería Mecánica. Universidad de Cienfuegos.

González Maqueira, Miguel. (2000). Estudio teórico sobre la combustión heterogénea, aplicación a la combustión de biomasas. Trabajo de Diploma. España. Escuela Superior de Ingeniería Industriales y Minas de Vigo.

Infante, Cesar. (2010). Evaluación térmica de prototipo de estufas eficientes para diferentes Biomasas. Trabajo de Diploma .Universidad de Cienfuegos.

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

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

Schneider, Herbert E. (2008). Desarrollo de una nueva cocina mejorada para leña basada en el principio de gasificación de flujo cruzado natural. Trabajo de Diploma. (En opción del título de Ingeniero Mecánico). Antiguo Cuscatlán, El Salvador.

ANEXOS

ANEXO 1 Tablas de Experimentos Realizados.

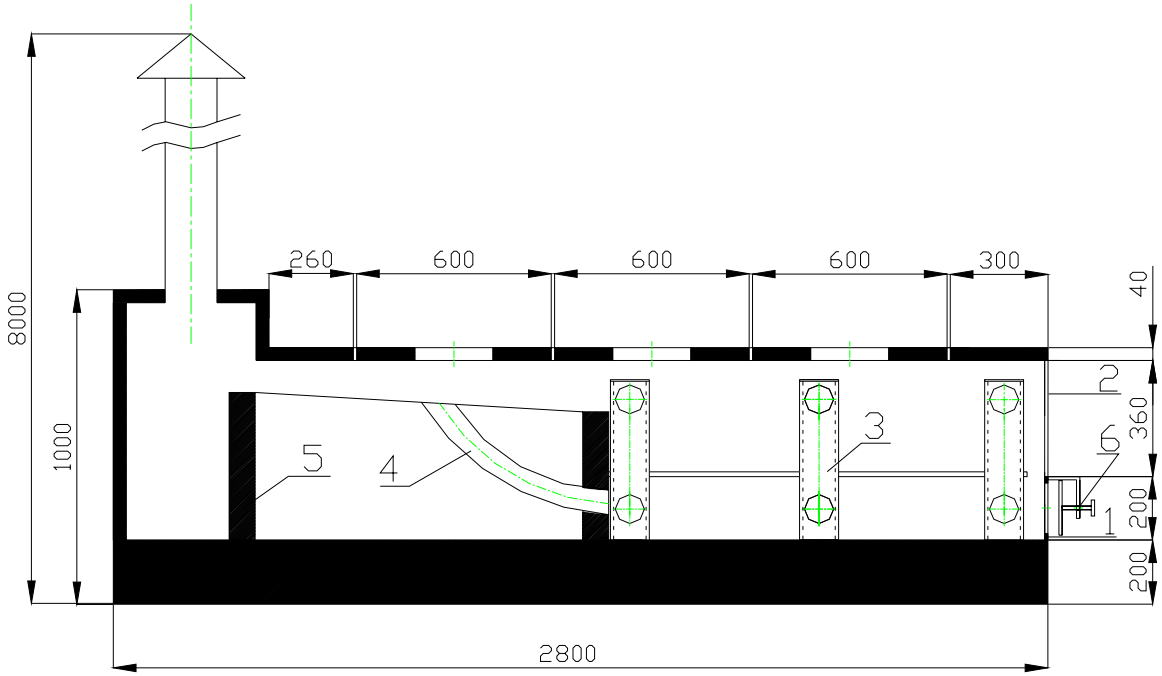
Tabla de resultados obtenidos en el experimento con Cáscara de Café.

Área de Gasificación, (m^2)	(ICP), (g/min)
0.0133	11.5
0.0188	12.3
0.0275	13.6
0.0261	12.80
0.0377	13.75
0.0432	14.60
0.0199	13.06
0.0400	13.95
0.0396	14.73

Tabla de resultados obtenidos en el experimento con Aserrín de Madera.

Área de Gasificación, (m^2)	(ICP), (g/min)
0.0133	8.66
0.0188	9.8
0.0275	12.63
0.0293	10.48
0.0262	11.32
0.0432	15.4
0.0147	7.96
0.0199	9.3
0.0396	13.06
0.0388	15.94

ANEXO 2 Modificación del Fogón actual de La EMA.

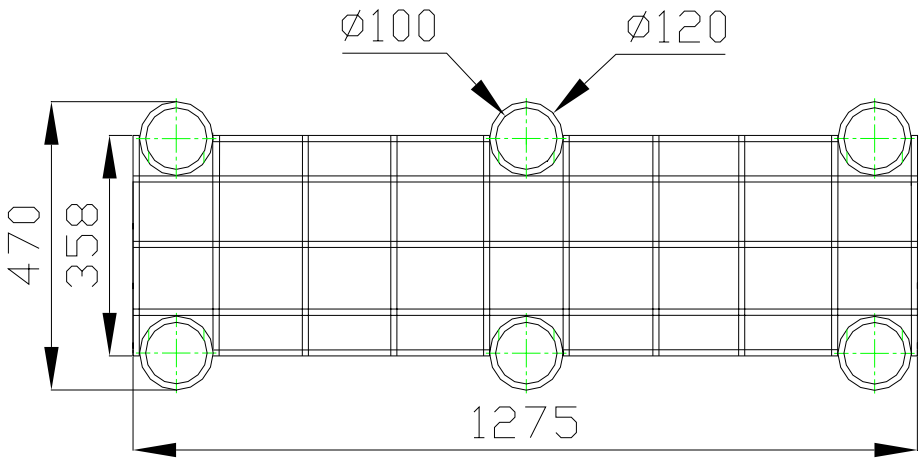


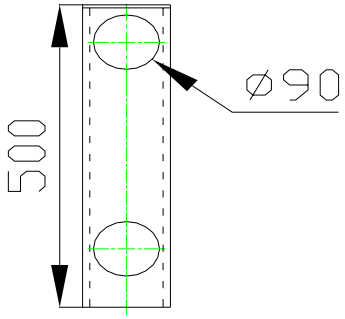
FIRMA Y FECHA						Plano De Ensamble Del Fogón De Leña Modificado
SUSTITUYE A:						
No. INV. D.						
FIRMA Y FECHA	MOD	CANT	No.NOTIF.	FIRMA	FECHA	
		DIBUJÓ	Oriel Glez		8-6-2011	
No. INV. O.T.		PROYECTÓ				
		REVISÓ				
		CONT.TEC.				
		CONT.NOR.				
		APROBÓ				

ETAPAS DE ELABORACIÓN				
D.T.				
MASA	ESCALA	HOJ.No	CANT.H	

FFUND: I 00 – 00 PE

ANEXO 3 Parrilla para la Modificación del Fogón.





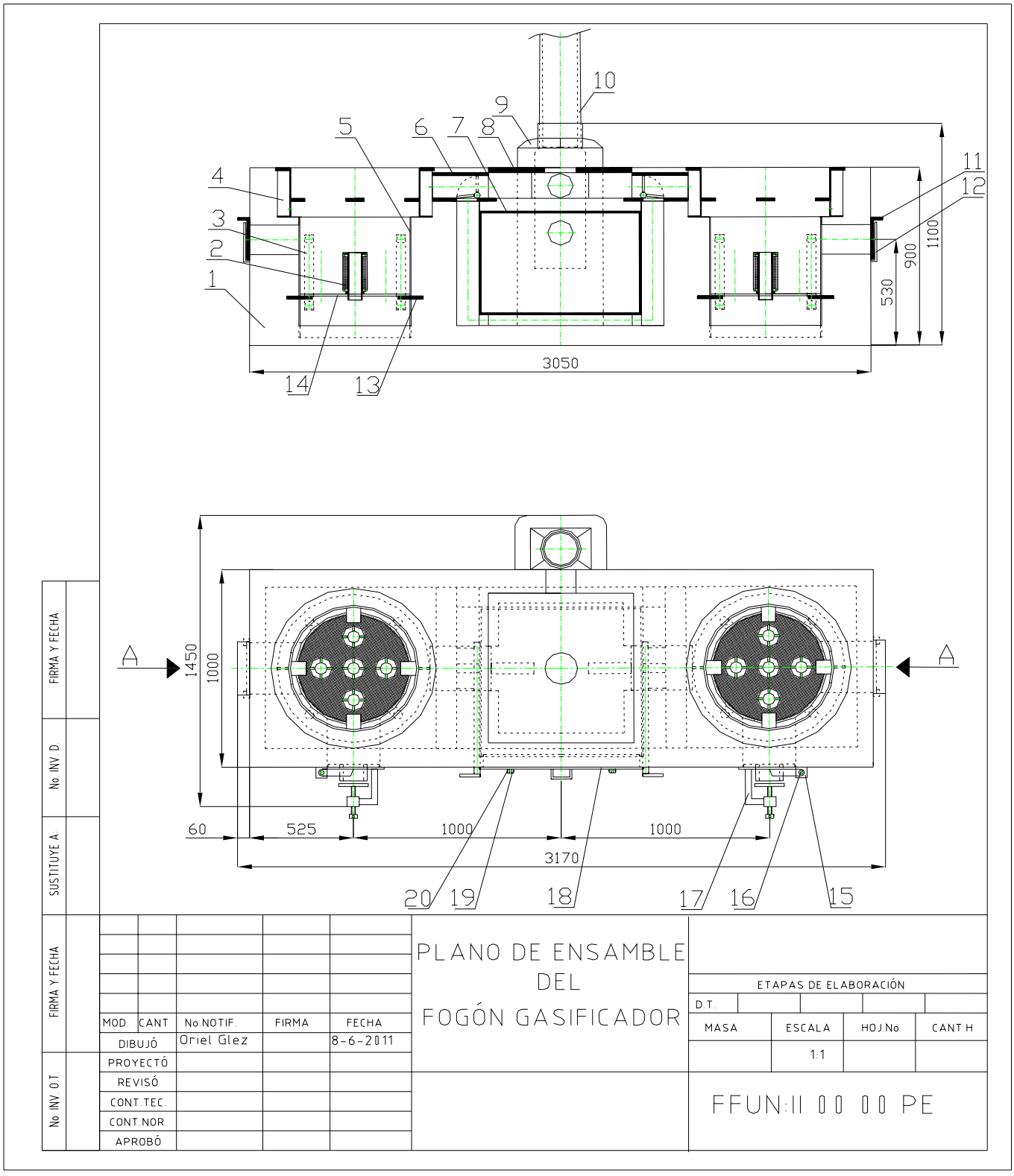
FIRMA Y FECHA						
No. INV. D.						
SUSTITUYE A:						
FIRMA Y FECHA						
	MOD.	CANT	No NOTIF.	FIRMA	FECHA	
	DIBUJÓ		Oriel Glez		8-6-2011	
No. INV. O.T.	PROYECTÓ					
	REVISÓ					
	CONT. TEC.					
	CONT. NOR.					
	APROBÓ					

Parrilla Del Fogón
De Leña Modificado

ETAPAS DE ELABORACIÓN				
D.T.				
MASA	ESCALA	HOJ. No	CANT. H	

ANEXO 4 Nomenclatura de pieza del Plano de Ensamble.

Formato	Zona	Posición	Código	Denominación	Cant.	OBS
1	2	3	4	5	6	7
				Documentación		
A4			FFund. II 00 - 00 PE	Planos de Ensambles	1	
A4		1	FFund. II 01 - 00 PE	Cuerpo del Fogón	1	
A4		2	FFund. II 02 - 00 PE	Gasificadores	1	
A4		4	FFund. II 03 - 00 PE	Hornilla Recuperativa	2	
A4		6	FFund. II 04 - 00 PE	Dispos. Distrib. Gases	2	
A4		7	FFund. II 05 - 00 PE	Horno	1	
A4		9	FFund. II 06 - 00 PE	Soporte de Chimenea	1	
A4		17	FFund. II 07 - 00 PE	Puerta para Cenizas	2	
A4		18	FFund. II 08 - 00 PE	Puerta del Horno	1	
A4		3	FFund. II 00 - 01	Conducto Aire Secund.	8	
A4		5	FFund. II 00 - 02	Cubierta Cámara Comb.	2	
A4		8	FFund. II 00 - 03	Hornilla Plana	1	
A4		10	FFund. II 00 - 04	Chimenea	1	
A4		11	FFund. II 00 - 05	Tapa Cierre Alim. Comb.	2	
A4		12	FFund. II 00 - 06	Guías de Tapa Comb.	2	
A4		13	FFund. II 00 - 07	Soporte de la Parrilla	8	
A4		14	FFund. II 09 - 00	Parrilla de Combustible	2	
A4		15	FFund. II 00 - 09	Pasad. Puerta Cenicero	4	
A4		16	FFund. II 00 - 10	Orejas para Pasad. Cen.	8	
A4		19	FFund. II 00 - 11	Orejas de Puerta Horno	4	
A4		20	FFund. II 00 - 12	Pasadores Puerta Horno	2	
				MATERIALES		
				Electrodos	5 kg	

					PLANO DE ENSAMLE DEL FOGÓN GASIFICADOR					
Mod.	Cant.	N0.Notif	Firma	Fecha						Hoja N0.1
Elab.	Oriel									Cant. Hojas
Rev.						FFUND: II 00 - 00 PE				
Cont.										
Cont.										
Aprob.										

ANEXO 5 Plano de Ensamble del Diseño del Prototipo de Fogón Gasificador.