



REPÚBLICA DE CUBA
MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR
UNIVERSIDAD DE CIENFUEGOS
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE MECÁNICA

Trabajo de Diploma

Diseño de horno para la combustión de la cáscara de arroz.

Autor: Osmany Jesús Castillo Mejías
Tutor: Dr. Pedro Fundora Beltrán

“AÑO 60 DE LA REVOLUCIÓN.”

Cienfuegos, Junio 2018

DECLARACION DE AUTORIDAD
UNIVERSIDAD DE CIENFUEGOS



Sistema de Documentación y Proyecto.

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

Firma del autor.

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

Información Científico Técnico

Nombre y Apellidos. Firma.

Vice Decano.

Nombre y Apellidos. Firma.

Firma del Tutor

Nombre y Apellidos. Firma.

Sistema de Documentación y Proyecto.

Nombre y Apellidos. Firma

Pensamiento

"Hay una fuerza motriz más poderosa que el vapor, la electricidad y la energía atómica: la voluntad."

Albert Einstein

Dedicatoria

Dedico este trabajo a todas esas personas que de una forma u otra han estado presente en mi vida, desde mi infancia hasta la actualidad; que me han formado como hombre de bien educándome en cada detalle de la vida.

Especialmente a mis padres, hermanos y abuelos quienes son importantísimos en mi vida.

A mis amigos más cercanos por su apoyo incondicional.

A mi pareja por su ayuda y compañía en toda esta trayectoria universitaria.

Agradecimientos.

Agradezco a mi país por haberme dado la oportunidad de estudiar, a esta universidad y a sus profesores por dedicarnos todo este tiempo para nuestra formación profesional.

A todos mis compañeros de clase y a mis amigas de la carrera de Lengua Inglesa por contribuir en mis resultados académicos por su tiempo dedicado.

A mi tutor por compartirme todo su conocimiento y darme las herramientas para el desarrollo de este trabajo.

A todos Gracias...

Resumen

El siguiente proyecto fue realizado en la Empresa Agroindustrial de Granos Aguada en el municipio de Aguada de Pasajeros. Esta empresa se especializa en el cultivo y procesamiento de arroz, teniendo como resultado grandes cantidades de cáscara de arroz como subproducto. Para eliminar esta biomasa se hace un análisis energético para el diseño de un horno de combustión de cáscara de arroz. Se analizan las propiedades físicas y químicas de la cáscara además su poder calórico dependiendo de su humedad, dando como resultado que es una buena alternativa como combustible sustituto del diésel usado en la empresa para el seque del grano. La cantidad de cáscara de arroz producida por la empresa es suficiente para secar todo el arroz que procesa la empresa y queda más de un 49% para otros usos. Después de investigar sobre los tipos de hornos que se utilizan en la combustión de biomasa y sus diseños, se realiza el diseño del horno de combustión de la cascarilla de arroz con el fin de usarlo para el seque del grano y se hace un análisis económico para el fabricación de mismo.

Palabras claves: Cáscara de arroz, poder calórico, combustión, diésel, horno de combustión.

Abstract

The following project was carried out in the Agroindustrial Company of Grains Aguada in the municipality of Aguada de Pasajeros. This company specializes in the cultivation and processing of rice, resulting in large quantities of rice husk as a by-product. To remove this biomass, an energy analysis is made for the design of a rice husk combustion furnace. The physical and chemical properties of the shell are analyzed in addition to its caloric power depending on its humidity, resulting in it being a good alternative as a substitute fuel of the diesel used in the company for drying the grain. The amount of rice husk produced by the company is enough to dry all the rice processed by the company and more than 49% is left for other uses. After researching the types of kilns used in the combustion of biomass and their designs, the design of the combustion furnace of the rice husk is carried out in order to use it for drying the grain and an economic analysis is made to the making of it.

Índice

Introducción	1
Problema Científico.	2
Hipótesis.	2
Objetivo general.	2
Objetivos específicos.	2
Capítulo I: Estado documental del uso energético de la cáscara de arroz como biomasa.	4
1.1 Uso histórico de la biomasa como combustible.	4
1.2 Utilización de la biomasa.	4
1.3 Procedencia de la biomasa de la biomasa.	6
1.4 La biomasa como fuente de energía.	8
1.5 Características de la biomasa.	10
1.6 Situación mundial de la biomasa.	11
1.7 Uso de la biomasa en Cuba.	12
1.7.1 La cáscara de arroz en Cuba.	12
1.8 La cascarilla de arroz como biomasa.	12
1.8.1 Uso de la cáscara de arroz como combustible en hornos de combustión.	13
1.9 Obtención de un biocombustible a partir de una biomasa (cáscara de arroz).	15
1.10 Briquetas y Pellets.	16
1.11 Gasificación.	17
1.11.1 Diferencia entre gasificación y combustión.	17
1.11.2 Gasificador.	18
1.11.3 Proceso de gasificación.	18
1.12 Tipos de horno para combustionar biomosas.	19
Figura 1.1. Principales tecnologías de combustión para la biomasa.	20
Combustión en lecho fijo.	20
Figura 1.2 Parrilla móvil inclinada.	21
Figura 1.3 Diagrama de un horno de parrilla móvil horizontal.	22
Combustión en lecho fluidizado (LFB).	22
Combustión fluidizado de recirculación.	23
Conclusiones del Capítulo I.	24
Capítulo II: Análisis energético de la cascarilla de arroz y selección del horno a partir de la inclusión del principio de multitubularidad provocada.	26
2.1 Análisis aproximado de la cáscara de arroz.	26

Tabla 2.1 Análisis próximo de la cascarilla de arroz en diferentes Variedades y por diferentes países.....	26
Tabla 2.2 Análisis Próximo de la cascarilla de Arroz en Cuba.....	26
2.1.2 Análisis elemental de la cáscara de arroz.	27
Tabla 2.3 Composición elemental de la cascarilla de arroz a diferentes % de humedad.....	28
Tabla 2.4 Poder calorífico inferior de la cascarilla de arroz a partir del contenido de humedad.	28
2.3 Punto de fusión y ensuciamiento de la ceniza de la cáscara de arroz.	29
Tabla 2.5 Composición mineral de las cenizas de cascarilla de arroz a nivel mundial	29
Tabla 2.6 Índice de Álcali	30
2.4 Cantidad de cascarilla producida por la empresa.....	31
2.4.1 Energía producida por la cantidad de cascarilla producida por la empresa.	31
2.4.2 Cantidad de cascarilla necesaria para el secado de la producción del año en kilogramos (Kg).	31
2.5 Ahorro de combustible.....	32
2.6 Análisis para el diseño del horno de combustión de la cáscara de arroz.	32
2.6.1 Selección del horno para la combustión de la cáscara de arroz.	32
Figura 2.1 Horno de Lecho fluidizado	33
2.7 La Multitubularidad y la efectividad de la combustión de los combustibles.....	33
2.7.1 Gasificación de las biomásas en la combustión, multitubularidad provocada.....	34
2.8 Determinación del índice de transformación de las biomásas en el proceso de gasificación (ψ).	35
Conclusiones del Capítulo II.....	38
Capítulo III: Diseño de horno para la combustión de la cáscara de arroz aplicando el principio de multitubularidad.....	40
3.1 Análisis para el diseño.	40
3.1.1 Determinación del volumen de producto a secar por hora.....	40
3.1.2 Cálculo de la cantidad de agua a remover de los granos	40
3.2 Cantidad de aire necesario que entrara al horno para la combustión.....	41
3.2.1 Cantidad de ceniza de cáscara de arroz obtenida por masa de cáscara de arroz quemada. .	41
3.3 Perdidas de calor en el horno y eficiencia.....	41
3.4 Cálculo del flujo de combustible.	43
3.5 Volumen de cámara de combustión.....	43
3.5.1 Tolva alimentadora del horno.....	44
3.6 Metodología para el dimensionado de los dispositivos de gasificación.	44
3.6.1 Principio de la macro multitubularidad.....	45
3.6.2 Calculo del número de gasificadores y del área perimetral de un gasificador.....	45

3.7 Dimensiones de la chimenea.....	47
3.7.1 El diámetro de salida de la chimenea.....	47
3.8 Diseño del intercambiador de calor	47
Figura 3. Balance de energía.....	48
Tabla 8. Valores del coeficiente de transferencia global.....	50
Conclusiones del Capítulo III.....	53
Capítulo IV: Análisis preliminar del costo del horno de combustión de cáscara de arroz.....	55
4.1 Análisis económico para el diseño del horno de combustión.....	55
4.2 Costo de materiales.....	56
4.3 Gasto en salario.....	57
4.4 Gasto generado por la amortización de los equipos.....	58
4.5 Costo por el consumo de energía eléctrica.....	59
4.6 Total de gastos directos.....	60
4.6.1 Total de gastos indirectos.....	60
4.7 Costo total de fabricación del horno.....	60
Conclusiones del Capítulo IV:.....	61
Conclusiones Generales.....	62
Recomendaciones.....	63
Bibliografía.....	64
Anexos.....	66

Introducción

En los últimos treinta años, la crisis energética mundial ha obligado a las empresas del sector industrial y agroindustrial a buscar nuevas alternativas de fuentes de generación de energía a más bajo costo y con menos influencia negativa en el medio ambiente. Es imposible negar la creciente escasez de los combustibles fósiles, y el daño ambiental que produce su explotación y utilización en la industria y el alto costo que implicaría utilizar la generación de energía aprovechando fuentes naturales como la corriente de los ríos, las caídas de agua, la energía de los vientos, la energía solar, y otras pueden considerarse ecológicamente convenientes, sin embargo en unas presupone una infraestructura e inversión inicial considerable, y en otras es dependiente de condiciones ambientales y geográficas específicas que no permiten su masificación(es decir la presencia de zonas en el planeta aun en niveles tecnológicos y científicos muy atrasados) . Este hecho obliga a las industrias a buscar fuentes alternativas de generación de energía. Ante la necesidad de desarrollar alternativas tecnológicas que permitan la utilización de elementos desechados en procesos productivos para aprovechar su potencial y contribuir a la disminución del impacto ambiental que puedan generar por una inadecuada disposición, surge la oportunidad de aprovechar productos vegetales de desecho que permitan innovar en el área de los materiales de ingeniería, campo en el cual la cascarilla de arroz se perfila como un aislante térmico de alta efectividad, competitividad y de fácil obtención, lo cual contribuye al reemplazo de productos derivados del petróleo.

El municipio Aguada de Pasajeros perteneciente a la provincia de Cienfuegos, es conocido por alto nivel de producción del grano de arroz. Teniendo presente la experiencias acumulada por la localidad en los últimos 11 años en la introducción de la dirección por objetivos, se consideró oportuno iniciar la aplicación de la planeación estratégica hasta el 2025, con el objetivo de emplear con creatividad las técnicas modernas de la ciencia de la dirección, para consolidar el desarrollo económico y social del territorio y la mejora de la calidad de vida de nuestra población.

La Resolución No. 204/1976, creó la Empresa Pecuaria Aguada, con Domicilio Legal en Primargal # 24, mediante la Resolución 402/2012 cambia su denominación por el **de Empresa Agroindustrial de Granos Aguada**. Ampliando su objeto empresarial, facultándola de modo general para producir y comercializar de forma mayorista granos en sus distintas formas y sus subproductos, así como las semillas en pesos cubanos y pesos convertibles.

Los grandes desechos de cascarilla de arroz en la empresa es un problema ya que por cada tonelada que se produce de arroz comestible el 22% es cáscara, la cual no se le da ningún uso, ya que no sirve para el consumo animal y su biodegradación es muy lenta, convirtiéndose en un contaminante. Se dio la tarea de utilizar esta biomasa como combustible sustituto del petróleo, el cual usan en la empresa para alimentar un quemador que produce el calor requerido para el seque del grano. Mediante la utilización de un horno para la combustión de la cascarilla de arroz, y posterior uso en el seque del grano.

Problema Científico.

La cáscara de arroz por su alto volumen, su lento nivel de biodegradación y su inutilidad como alimento, constituye un subproducto contaminante para la Empresa Agroindustrial de Granos Aguada.

Hipótesis.

Si se realiza un análisis energético y diseño de un horno para la combustión de la cáscara de arroz será posible usar la cascarilla de arroz como combustible en el seque del grano y así darle utilidad a la misma.

Objetivo general.

Realizar el diseño de un horno para la combustión de la cáscara de arroz con el fin de usarse el proceso de seque del arroz.

Objetivos específicos.

- Revisión y resumen bibliográfico referente a las biomásas y a sus potencialidades como combustibles y a los diferentes tipos de hornos.
- Realizar una búsqueda bibliográfica acerca de las propiedades físicas y químicas de la cascarilla de arroz antes y después de quemada.
- Aplicación de la metodología de diseños de horno aplicándole el principio de multitubularidad.
- Determinar el costo preliminar del horno diseñado.

Capítulo I

Estado documental del uso energético de la bimosa y cáscara de arroz.

Capítulo I: Estado documental del uso energético de la cáscara de arroz como biomasa.

1.1 Uso histórico de la biomasa como combustible.

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

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

1.2 Utilización de la biomasa

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

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

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

La biomasa representa aproximadamente de toda la energía que se consume en los países en vías de desarrollo y casi el 90 % de algunos de los países desarrollados. Más de 2 mil millones de personas

siguen contando con combustibles de la biomasa y las tecnologías tradicionales para cocinar y como calefacción. Entre 1,5 y 2,0 mil millones personas no tienen acceso a la electricidad.

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

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

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

A partir de la década de los 80 comenzó a notarse en el planeta cambios globales producidos por la contaminación al medio, la mayor parte de esa contaminación es debido a la producción de electricidad en plantas que utilizan para la generación combustibles fósiles los cuales; como resultado de su combustión; emiten a la atmosfera la mayor cantidad de CO₂, NO_x, SO_x, vapores de agua y otros contaminantes.

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

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

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

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

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

1.3 Procedencia de la biomasa.

Plantaciones Energéticas.- Estas son grandes plantaciones de árboles o plantas cultivadas con el fin específico de producir energía. Para ello se seleccionan árboles o plantas de crecimiento rápido y

bajo mantenimiento, las cuales usualmente se cultivan en tierras de bajo valor productivo. Su período de cosecha varía entre los tres y diez años (Collective authors, 1995).

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

1.4 La biomasa como fuente de energía.

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

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

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

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

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

El Recurso biomásico.

Se considera que la biomasa es una fuente renovable de energía porque su valor proviene del sol. A través del proceso de fotosíntesis, la clorofila de las plantas captura su energía y convierte el dióxido de carbono (CO₂) del aire y el agua del suelo en carbohidratos, para formar la materia orgánica. Cuando estos carbohidratos se queman, regresan a su forma de dióxido de carbono y agua liberando la energía que contienen. De esta forma, la biomasa funciona como una especie de batería que almacena la energía solar. Entonces se produce en forma sostenida, o sea, en el mismo nivel en que se consume, esta batería durará indefinidamente.

Los recursos biomásicos incluyen cualquier fuente de materia orgánica, como desechos agrícolas y forestales, plantas acuáticas, desechos animales y basura urbana. Su disponibilidad varía de región a

región, de acuerdo con el clima, el tipo de suelo, la geografía, la densidad de la población, las actividades productivas, etc.; por eso, los correspondientes aspectos de infraestructura, manejo y recolección del material deben adaptarse a las condiciones específicas del proceso en el que se deseen explotar (Mencía, 2011).

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

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

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

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

1.5 Características de la biomasa.

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

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

Contenido de humedad (HR).- Es la relación de la masa de agua contenida por kilogramo de materia seca. Para la mayoría de los procesos de conversión energética es imprescindible que la biomasa tenga un contenido de humedad inferior al 30%. Muchas veces, los residuos salen del proceso productivo con un contenido de humedad muy superior, que obliga a implementar operaciones de acondicionamiento, antes de ingresar al proceso de conversión de la energía.

Porcentaje de cenizas.- Indica la cantidad de materia sólida no combustible por kilogramo de material. En los procesos que incluyen la combustión de la biomasa, es importante conocer el

porcentaje de generación de ceniza y su composición, pues, en algunos casos, esta puede ser utilizada; por ejemplo, la ceniza de la cascarilla de arroz es un excelente aditivo en la mezcla de concreto o para la fabricación de filtros de carbón activado.

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

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

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

1.6 Situación mundial de la biomasa.

Más de 2 mil millones de personas siguen contando con combustibles de la biomasa y las tecnologías tradicionales para cocinar y como calefacción. Entre 1,5 y 2,0 mil millones de personas no tienen acceso a la electricidad. La baja eficiencia actual del uso de la biomasa significa que aunque esta, se consume globalmente en una proporción alta, produce sólo un nivel bajo de servicios de energía. En todas sus formas, actualmente la biomasa provee una cantidad aproximada de 1250 millones de toneladas equivalente de petróleo, lo que representa casi el 14% del consumo anual de energía mundial. Incluso en los países desarrollados, la biomasa se está utilizando cada vez más. En varios de los países desarrollados el uso de esta fuente se ha incrementado sustancialmente, por ejemplo, en Suecia y Austria, el 15% del consumo de energía primaria está cubierta por la biomasa. Suecia tiene planes para aumentar el uso adicional de la biomasa, y entrar en fase de remplazo de las plantas

nucleares y de combustibles fósiles. La utilización de la biomasa sustituye parcialmente a los combustibles fósiles y tiene una importancia adicional atendiendo a las preocupaciones del calentamiento global, ya que la combustión de la biomasa tiene el potencial de tener el CO₂ neutral. La biomasa es la mayor fuente de energía de los países en vía de desarrollo, donde se proporciona el 35% de todos los requerimientos de energía. Los combustibles biomásicos utilizados hoy en los países en desarrollo han sido llamados “El petróleo del hombre pobre” debido al uso directo de la combustión en la cocina doméstica. La biomasa puede ser llamada más apropiadamente “El petróleo de la mujer pobre” ya que esta, junto a los niños en las áreas rurales, gastan cantidad de tiempo colectando madera combustible y sufriendo el ambiente de la polución del aire interior causado por la combustión de la biomasa para calentar y cocinar (Mencia,2011).

1.7 Uso de la biomasa en Cuba.

En Cuba la principal fuente de energía renovable es la biomasa, ya que no existen grandes ríos, ni zonas con altas velocidades del viento. Si bien el mayor potencial energético lo tiene la biomasa cañera, existen otras fuentes que tienen importancia en el orden local o que su aprovechamiento resulta conveniente desde el punto de vista medio ambiental. Este es el caso de los bosques naturales y las plantaciones energéticas en desarrollo, los residuos agroindustriales y los urbanos. La utilización de estas fuentes en la generación de electricidad está muy vinculada al desarrollo de tecnologías eficientes que permitan que esta producción sea competitiva con el uso de los combustibles convencionales en las condiciones específicas de los países en desarrollo. En esta dirección se trabaja intensamente, por lo que es necesaria la realización de proyectos demostrativos que faciliten la transferencia y evaluación de éstas en las condiciones de los países de menor desarrollo.

1.7.1 La cáscara de arroz en Cuba.

La cantidad de cascarilla que se genera, año tras año en Cuba puede superar las 736 200 000 t/año (Díaz, 2015), con el agravante de que por su baja degradabilidad natural, se acumula en el ambiente, generando situaciones extremas de contaminación. Se le da un ínfimo uso a nivel nacional, como subsuelo de corrales de animales y en escasos como combustible para secar el arroz en algunos molinos del país.

1.8 La cascarilla de arroz como biomasa.

La cascarilla de arroz es la corteza dura que cubre el grano de arroz, y constituye aproximadamente entre el 22% y 25 % del volumen de arroz que es procesado. Es considerada como un residuo debido

a la dificultad que posee para ser comestible. De igual manera, su biodegradación no es sencilla ya que presenta un alto contenido de sílice y materia.

La cáscara tiene forma de canoa, una superficie rugosa y un color amarillento, sus dimensiones dependen de la variedad obtenida aunque el tamaño típico suele ser de 8-10 mm de longitud y 1-2 mm de ancho (Ver figura 1 de anexo), y en cuanto a la densidad se estima un valor de 100 kg/m^3 aunque si es sometida a procesos de compactación y molienda, su valor puede situarse en torno a los $180\text{-}250 \text{ kg/m}^3$. En la conducción térmica se encuentra en $0.036 \text{ W/m}\cdot\text{K}$, lo que denota su buen uso en la fabricación de materiales aislantes.

Su constitución por Celulosa y Sílice, ayudan a su buen rendimiento como combustible. El uso de la cascarilla como combustible representa un aporte significativo a la preservación de los recursos naturales y un avance en el desarrollo de tecnologías limpias y económicas en la producción de arroz uno de los principales cereales de nuestra canasta familiar.

La cascarilla de arroz presenta una gran variedad de características fisicoquímicas que es preciso estudiar, según la aplicación que se desee darle. El contenido de humedad, la composición química y el poder calorífico de la cascarilla son aspectos que hay que conocer para la construcción y el funcionamiento de hornos y hogares mecánicos que son los más adecuados para la quema e incineración de este subproducto agrícola.

Como el uso de la cascarilla se basa en el objetivo de reducir su volumen, hoy diferentes aplicaciones que se les da, como son:

- Uso como combustible en procesos de generación de energía eléctrica y térmica.
- Procesos de combustión para su uso como sustrato y cenizas en cultivos.
- Compostaje en estaciones depuradoras de aguas residuales, lodos de depuración o purines.
- Producción de tableros, cerámicas cementos y materiales aislantes destinados a su uso en la construcción.
- Fabricación de abonos naturales.

1.8.1 Uso de la cáscara de arroz como combustible en hornos de combustión.

El uso de nuevas fuentes renovables de energía, como la cascarilla de arroz, para producir calor de proceso o vapor de alta presión para generar energía eléctrica, busca cambiar el pensamiento de personas y empresas, para la toma de decisiones, en cuanto al tema de la conservación del medio

ambiente. El uso de estas tecnologías, están siendo incentivadas por la mayoría de los gobiernos del mundo ante el impacto ambiental que genera utilizar combustibles fósiles. A través de estrategias, como la reducción de impuestos a quien utilice este recurso como combustible, también, a través de inversiones públicas a quien incorpore proyectos que utilicen estos recursos, o multas económicas a quienes no utilicen en un plazo fijo, tecnologías de energías renovables. Todo esto se hace buscando contrarrestar el alto impacto ambiental negativo que genera el uso de los combustibles fósiles.

Existen varias razones para la utilización de la biomasa, para la fertilización y conservación de suelos, como materia prima en procesos industriales, para la alimentación humana o animal o para producir energía, esta última es en lo que se ocupa este documento.

Las consecuencias de quemar la cascarilla de arroz a cielo abierto, son diversas. En primer lugar, los humos generados por la quema de la cascarilla de arroz tienen un efecto negativo en el aire que se respira, tiene un aspecto grisáceo y puede afectar una zona de hasta un radio de 2 km a la redonda. Este aire también genera otros efectos negativos para los humanos, como irritación en la piel y molestias en los ojos, activación de enfermedades respiratorias. Al quemar la cascarilla también se generan partículas volátiles, estas partículas muchas veces entran en contacto con plantas en crecimiento, perjudicando su normal desarrollo.

Al enterrar la cascarilla se está manejando de forma inadecuada la disposición final de este desecho, ya que para que la cascarilla pueda descomponerse, se necesita de tiempos muy largos, en los cuales la cascarilla estará perjudicando el suelo, liberando celulosa y ácido acético, perjudicando el crecimiento de nuevas plantas. En suelos con humedad alta, los microorganismos que descomponen la cascarilla también estarán compitiendo por oxígeno con el suelo, quitándoselo a las plantas que pueden estar sembradas en éste.

Se podría pensar, que la quema de la cascarilla para el uso como combustible, no es una solución más amigable con el ambiente y que necesariamente ocasionaría mayores problemas en relación con la quema a cielo abierto, la verdad es, que todo sistema para el desarrollo de procesos industriales, ya sea para calor o generación de electricidad, contamina, pero estos procesos son controlados y regulados por leyes y autoridades ambientales. Es decir, ahora la quema de la cascarilla de arroz, será un proceso, en donde se controla la emisión de los gases y material volátil al ambiente, y cabe

de nuevo mencionar, que estos gases son mucho más amables con el ambiente que los gases producidos por los combustibles fósiles.

Muchos de los residuos agroindustriales son eliminados por una práctica generalizada de quema abierta, ya que muchos de estos tienen la ventaja de devolver al suelo parte de las sales inorgánicas no volátiles y sirve además para el control de plagas. La cascarilla de arroz para este tipo de práctica presenta mayores desventajas que beneficios, ya que su alto nivel de sílice (SiO_2) hace que sea muy poco biodegradable y abrasiva.

Se puede pensar entonces que la quema de los residuos para la producción de energía, es un proceso menos noble que simplemente quemarlos, pero no es así, pues de la combustión de biomasa se pueden obtener vectores energéticos de mayor calidad en condiciones controladas y reguladas. Se puede utilizar biomasa como combustible si su poder calorífico es superior a 3200 Kcal/Kg³⁶, el de cascarilla de arroz es de 3650 Kcal/Kg. En la actualidad la cascarilla de arroz se transforma, se aprovecha como fuente de energía o cogeneración de calor o se vende, esto depende de la industria, de las tecnologías que maneje, la línea de producción, la exigencia medioambiental en temas de residuos de la región donde se encuentre ubicada, los precios de mercado de la energía eléctrica o fósil y de las propiedades físicas y químicas, las cuales ya están descritas en el capítulo 2.

1.9 Obtención de un biocombustible a partir de una biomasa (cáscara de arroz).

Para obtener biocombustibles a partir de una biomasa, se realizan unas transformaciones físicas, químicas o la combinación de las dos. Dentro de las físicas encontramos:

- Fragmentación: Su objetivo es aumentar la superficie específica, esto facilita la ignición y combustión del biocombustible, así mismo se logra homogeneizar el tamaño del combustible.
- Secado: El objetivo con el secado es aumentar el poder calorífico, este es utilizado mucho en los pellets y briquetas.
- Compactación: Sirve para aumentar su densidad y disminuir los gastos de almacenaje y transporte, así se obtienen los pellets y briquetas.

Las transformaciones químicas son muy diversas y dependen de la materia prima y del biocombustible final que se desea obtener.

1.10 Briquetas y Pellets

Las briquetas y los pellets son biocombustibles sólidos densificados. Estos están formados por la compactación de biomasa, la característica común es la alta densidad. Su forma y dimensiones dependen de cada proceso y fabricante.

El desarrollo de las briquetas y los pellets se dan por cinco razones:

- Para valorizar un residuo sólido orgánico que produce calor en su combustión.
- Para aumentar la densidad, la cascarilla de arroz tiene una densidad muy baja de 124 Kg/m³, lo que baja los costos de almacenamiento y transporte.
- Para sustituir combustibles sólidos fósiles.
- En el caso del pellet, para buscar un mejor manejo, ya sea para mover a paladas o cargarse automáticamente mediante cintas transportadoras.
- Para la eliminación de los residuos agroindustriales.

Los pellets son utilizados en estufas de alimentación automática, también pueden ser empleados en calderas. Las briquetas son usadas como combustible en el sector doméstico y como tacos de madera prensada.

Forma y tamaño. El pellet se diferencia de la briqueta en su tamaño, en el proceso de fabricación y en la forma del mismo. El aspecto del pellet en Latinoamérica y España es cilíndrica, con un diámetro menor o igual a los 25 mm, su longitud es variable, sólo que es más pequeño que las briquetas, aun así se han medido briquetas de 1 cm a 7 cm de largo.

La forma de las briquetas es muy variada y depende de la maquinaria utilizada en su obtención. Su diámetro generalmente supera los 50 mm y su longitud oscila entre los 50 y 80 mm. Normalmente a mayor diámetro mayor es la longitud, otra de las formas de las briquetas es con agujero redondo en el centro, esto permite una ignición más rápida, pero su desventaja radica a la hora del almacenamiento ya que se está perdiendo espacio útil por su forma, también podemos encontrar briquetas cuadrangulares, hexagonales, octogonales o redondeadas, esto permite que no se desintegre con los golpes.

Densidades. El objetivo de los procesos de peletización y briquetado es obtener un producto final de mayor densidad que los productos iniciales, se tienen en cuenta entonces la densidad aparente y

la densidad específica después de la compactación. Sin embargo debemos tener en cuenta los factores que influyen en la densidad de las briquetas y los pellets:

Mientras más alta sea la densidad de la biomasa mayor es la densidad del combustible densificado. Para el caso de la cascarilla de arroz la densidad de las briquetas y pellets es menor que el del aserrín de la madera que está alrededor de 250 Kg/m^3 con un 10% de humedad. Para aumentar la densidad la cascarilla de arroz puede ser combinada con parafina o algún otro aglomerante combustible.

La presión ejercida por la prensa en el proceso de fabricación son variables, y estas dependen de la maquinaria empleada. Para determinar la densidad aproximada basta con evaluar su masa en una balanza y su volumen, si se desea un resultado más exacto se efectúa el método de desplazamiento del agua, siempre y cuando la muestra esté combinada con parafina o silicona.

1.11 Gasificación.

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

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

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

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

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

1.11.1 Diferencia entre gasificación y combustión.

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

Combustible + Oxígeno Calor + Agua + Dióxido de Carbono

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

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

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

1.11.2 Gasificador.

El gasificador es el “corazón” del proceso de gasificación. El gasificador es el medio físico mediante el cual se proporcionan las condiciones adecuadas para llevar a cabo la gasificación del combustible y en la actualidad son cuidadosamente elaborados para procesarlo de varias maneras de acuerdo al tipo de combustible, la finalidad del biogás, el tamaño del proceso y la fuente de oxígeno. El oxígeno puede ser introducido como un gas puro o puede venir como una mezcla de aire o vapor (González, 2011).

1.11.3 Proceso de gasificación.

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

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

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

1.12 Tipos de horno para combustionar biomosas.

Los requisitos técnicos para una conversión completa de combustibles sólidos son como sigue:

- El aire de oxidación debe ser suministrado en exceso (más que el estequiométrico).
- El control del proceso debe tener una suficiente buena mezcla de los gases del combustible y del aire de combustión suministrado.
- La mezcla de los gases del combustible y el aire generados en el proceso, requiere de un tiempo suficientemente largo de detención en la zona de reacción.
- El proceso entero de combustión requiere una temperatura suficientemente alta.

Las calderas modernas de combustible sólido se diseñan para crear estas condiciones técnicas convenientes. Esencialmente se alcanzan estas condiciones por una separación espacial del suministro de aire al lecho (entrada de aire primario) y del suministro de aire a la zona de la combustión del gas del combustible (entrada de aire secundario) esto garantiza la combustión de los combustibles y una reducción de las emisiones.

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

Los sistemas de combustión que se describen aquí son de una capacidad térmica nominal que excede los 100kw. Estos hornos son generalmente equipados con sistemas de alimentación del combustible mecánico o neumático.

En principio, las tecnologías siguientes de la combustión pueden ser distinguidas:

- Combustión en lecho fijo.
- Combustión en lecho fluidizado.
- Combustión pulverizada del combustible.

Los principios básicos de estas tres tecnologías se demuestran en la Figura 1.1.

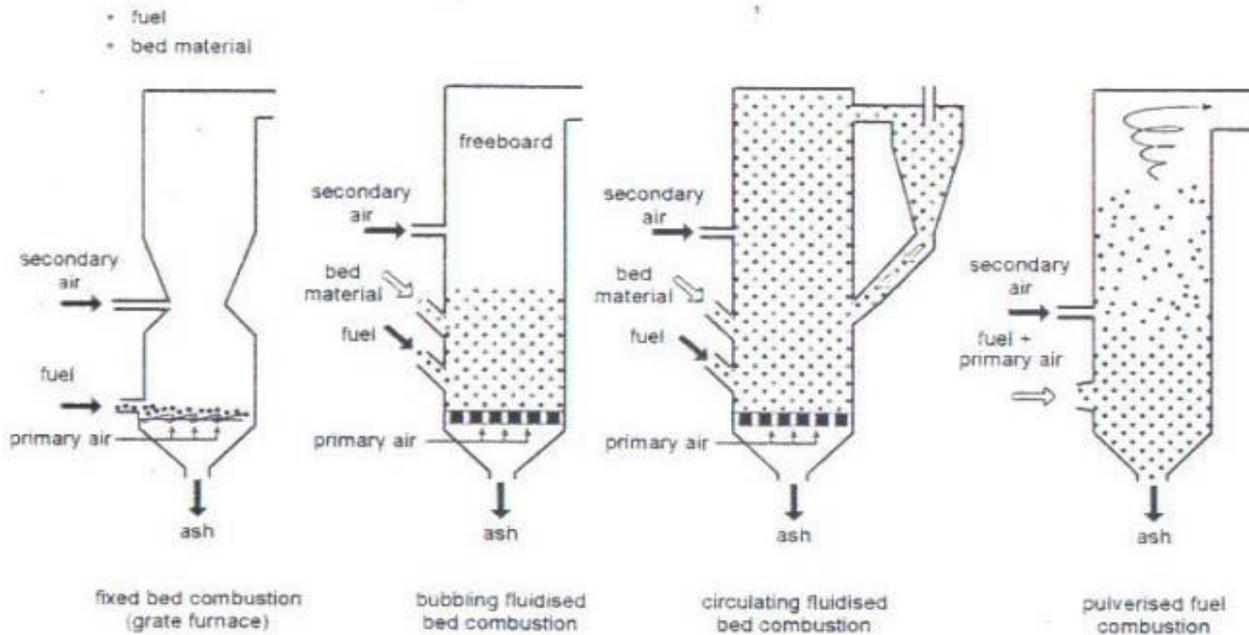


Figura 1.1. Principales tecnologías de combustión para la biomasa.

Combustión en lecho fijo.

En la combustión de lecho fijo como su nombre indica, la biomasa o combustible introducido en la cámara de combustión del horno arderá en reposo sobre una parrilla, la cual permitirá una entrada de aire primario por debajo de ella. Este tipo de horno también posee una entrada de aire secundario por encima del combustible en la cámara de combustión por donde entrara el aire necesario de forma natural por la combustión. Es muy importante en este tipo de horna la parrilla que utilice, pudiendo ser de forma horizontal o inclinada como se ve a continuación.

1. Horno de parrilla móvil inclinada.

El horno de parrilla móvil, tiene generalmente una parrilla inclinada que consiste en filas fijas y móviles de barras de la parrilla (véase figura 1.2) alternando los movimientos delanteros y posteriores horizontales de las secciones móviles, el combustible se transporta a lo largo de la parrilla. Así las

partículas inquemadas y quemadas del combustible son mezcladas, las superficies del lecho del combustible se renueva y una distribución más uniforme del combustible sobre la superficie de la parrilla puede ser alcanzada (que es importante para una distribución del aire primario igual a través del lecho del combustible).

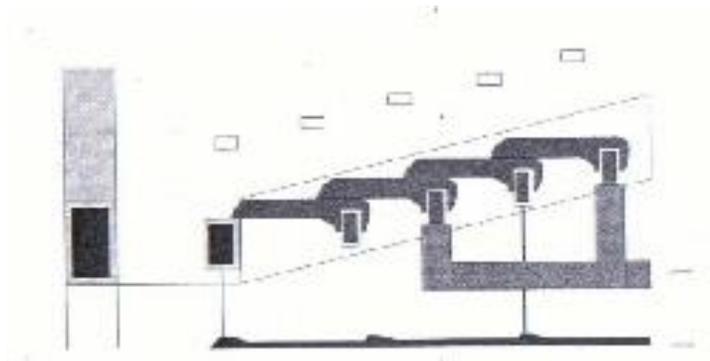


Figura 1.2 Parrilla móvil inclinada.

Generalmente, toda la parrilla se divide en varias secciones, que se pueden mover a varias velocidades según las diversas etapas de la combustión. El movimiento de las barras de la parrilla se logra por los cilindros hidráulicos. Las barras de la parrilla están hechas de aleaciones de acero a prueba de calor. Las barras de la parrilla están equipadas de pequeños canales en sus paredes laterales para el suministro de aire primario y debe ser tan estrecho como sea posible para distribuir el aire primario a través de lecho del combustible también como sea posible. En el horno de parrilla móvil, una gran variedad de combustible de biomasa puede ser quemada.

2. Horno de parrilla móvil horizontal.

La parrilla móvil horizontal, tiene un lecho de combustible totalmente horizontal. Esto se logra por la posición diagonal de las barras de la parrilla (véase figura 1.3). Las ventajas de esta tecnología son el hecho de que los movimientos incontrolados del combustible sobre la parrilla por la gravedad se impiden y que el efecto de atizado por el movimiento de la parrilla se incrementa, así llevando a una distribución más homogénea del material en la superficie de la parrilla e impidiendo la formación de la escoria como resultado de puntos calientes. Otra ventaja de la parrilla móvil horizontal es que la altura total puede ser reducida. Para evitar las partículas de ceniza y del combustible que caen a través de las barras de la parrilla, la parrilla móvil horizontal debe ser precargada de modo que no haya espacio libre entre las barras.

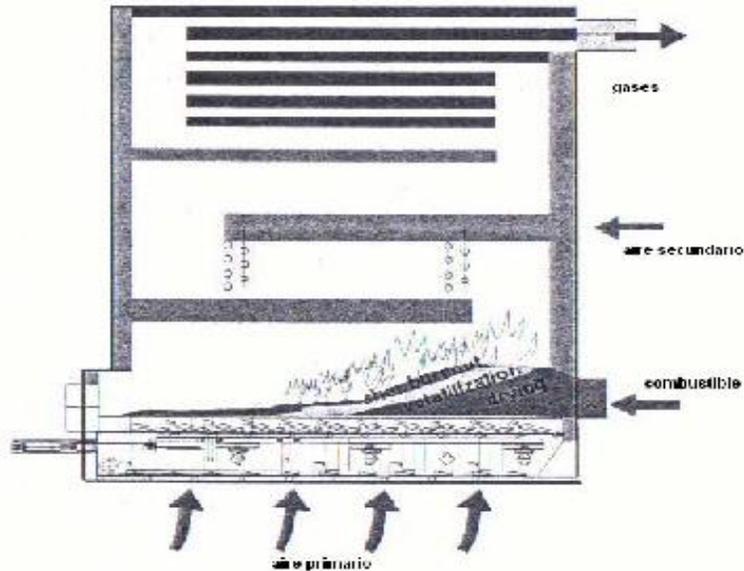


Figura 1.3 Diagrama de un horno de parrilla móvil horizontal.

Combustión en lecho fluidizado (LFB).

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

sobrecalentadores refractario alineados, en el primer y segundo paso. En hornos modernos de LFB la operación de carga parcial está en el rango de 60-100 por ciento de la carga nominal que sea posible.

Combustión fluidizado de recirculación.

Lecho fluidizado de recirculación (LFR) Aumentando la velocidad de fluidificación a 5-10m/s y usando partículas más pequeñas de la arena (0.2-0.4mm en diámetro) un sistema de LFR se obtiene. Las partículas de arena serán llevadas con el humo, separadas en un ciclón caliente o en un separador de U-viga y reingresando a la cámara de combustión La temperatura del lecho (700-900°C) es controlado por los intercambiadores de calor externos que refrescan la arena reciclada, o por las paredes refrigeradas por agua. La turbulencia más alta en hornos de LFR lleva a un mejor traspaso térmico y a una distribución muy homogénea de la temperatura en el lecho. Esto le a la ventaja de obtener condiciones estables de la combustión; el control del aire por etapas y la colocación de superficies de calefacción apropiadas en la parte superior del horno. Las desventajas del horno de LFR es su gran tamaño y por lo tanto un precio más alto; la carga del polvo aún mayor en el humo que deja el separador de partícula de arena en comparación con los sistemas de LFB; y el pequeño tamaño de la partícula del combustible requerido (diámetro de 0.1 - 40mm), que causa a menudo una inversión más alta en el tratamiento previo del combustible.

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

Conclusiones del Capítulo I.

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

Capítulo II

Análisis energético de la cascarilla de arroz y selección del horno a partir de la inclusión del principio de multitubularidad provocada.

Capítulo II: Análisis energético de la cascarilla de arroz y selección del horno a partir de la inclusión del principio de multitubularidad provocada.

2.1 Análisis aproximado de la cáscara de arroz.

La composición inmediata de una sustancia es el contenido (porcentaje en masa) de carbono fijo, volátiles, humedad y cenizas, en la Tabla 2.1 y 2.2 se muestra el análisis próximo de la cascarilla de arroz. Los volátiles tienen un papel importante durante la ignición en las etapas iniciales de la combustión de la biomasa. Tanto en el caso de la composición elemental como de la composición inmediata se debe determinar la humedad de la muestra.

Tabla 2.1 Análisis próximo de la cascarilla de arroz en diferentes Variedades y por diferentes países.

% Parámetros	Canadá				California		China
	V ₁	V ₂	V ₃	V ₄	V _i	V _T	V ₁
Material Volátil	66,40	67,30	63,00	67,70	63,52	65,47	51,98
Carbono Fijo	13,60	13,90	12,40	14,20	16,22	45,86	25,10
Ceniza	20,00	18,80	24,60	18,20	20,26	48,67	16,92
Total	100,0	100,0	100,0	100,0	100,00	100,0	100,00

En la tabla 2.1, se observa claramente que el porcentaje de carbono fijo se encuentra entre 12.40 – 25.10%, Las cenizas entre 16.92 – 24.6 % y el material volátil entre 51.98 – 67.7 % para las diferentes variedades utilizadas. El análisis próximo de la cascarilla cubana Tabla 2.2, está dentro de los rangos encontrados a nivel mundial, teniendo mucha similitud con los resultados obtenidos por otras bibliografías.

Tabla 2.2 Análisis Próximo de la cascarilla de Arroz en Cuba.

Elemento	%
Carbono fijo	16.67
Cenizas	17.89
Volátiles	65.47

2.1.2 Análisis elemental de la cáscara de arroz.

La composición elemental de una sustancia combustible es su contenido (porcentaje en masa) de carbono (C), hidrógeno (H), azufre(S), oxígeno(O), nitrógeno(N), humedad (W) y cenizas o material residual (A). Es la característica técnica más importante del combustible y constituye la base para los análisis de los procesos de combustión, entre ellos: cálculos de volúmenes de aire, gases y entalpía. Las siguientes composiciones elementales de la cascarilla de arroz se basan en los diferentes porcentajes de humedad analizadas en estudios previos.

La composición elemental del combustible Tabla 2.3, expresa el por ciento en masa de Carbono, Hidrógeno, Oxígeno, Nitrógeno, Cenizas y Humedad y se puede referir a:

- Masa de trabajo
- Masa analítica (Sin humedad externa)
- Masa seca (Sin humedad)
- Masa Combustible (Sin humedad y cenizas).

Los resultados obtenidos en la Tabla 1 de los Anexos muestran los siguientes rangos de variabilidad para cada elemento: Carbono 37.6- 42.6 %; Hidrógeno 4.7 – 5.78; Oxígeno 31.37 – 37.62; Nitrógeno 0.38 – 1.88; Azufre 0.01 – 0.18; Cenizas 16.93 – 24.6, con un poder calórico entre 13.24 - 14.22 Mj / Kg. El análisis de la cascarilla de arroz presentado en la Tabla 3 está dentro de los rangos encontrados a nivel mundial excepto los porcentajes de azufre y nitrógeno que se encuentran por fuera, teniendo en cuenta que el análisis a nivel mundial se realizó en base seca y el de Cuba con diferentes porcentajes de humedad El contenido de humedad de la cascarilla de arroz cuando sale del descascarador varía entre 5 y 40%, luego de estar expuesta a la intemperie, en época no lluviosa, la humedad promedio de la cascarilla esta aproximadamente entre el 8 y 15%. El contenido de humedad de la biomasa es la relación de la masa de agua contenida por kilogramo de materia seca. Para la mayoría de los procesos de conversión energética es imprescindible que la biomasa tenga un contenido de humedad inferior al 30%. Muchas veces, los residuos salen del proceso productivo con

un contenido de humedad muy superior, que obliga a implementar operaciones de acondicionamiento, antes de ingresar al proceso de conversión de energía.

Tabla 2.3 Composición elemental de la cascarilla de arroz a diferentes % de humedad.

Cascarilla de arroz %						
Humedad %	C	H	O	N	S	Cenizas
8.6	42.5	6.0	36.2	0.21	0.49	14.6
8.9	39.1	5.2	37.2	0.27	0.43	17.8
9.4	33.4	4.3	38.5	0.38	0.32	23.1

El porcentaje de cenizas indica la cantidad de materia sólida no combustible por kilogramo del material. En los procesos que incluyen la combustión de la biomasa, es importante conocer el porcentaje de generación de ceniza y su composición, pues en algunos casos, está puede ser utilizada, por ejemplo; la ceniza de la cascarilla de arroz como aditivo en la mezcla de concreto o para la fabricación de filtros de carbón activado entre otros.

El poder calorífico por unidad de masa (Tabla 2.4) es el parámetro que determina la energía disponible en la biomasa. Su poder calórico está relacionado directamente con su contenido de humedad. Un elevado porcentaje de humedad reduce la eficiencia en la combustión debido a que una gran parte del calor liberado se usa para evaporar el agua y no se aprovecha en la reducción química del material. Es calculado con la ayuda de la Tabla 2.3 mediante la siguiente fórmula:

$$Q^* = 339,147 \cdot C^* + 1256,1 \cdot H^* + 108,86 \cdot (S^* + O^*) - 25,12 \cdot (9 \cdot H^* + W^*) \quad (kJ/kg_{CA})$$

Tabla 2.4 Poder calorífico inferior de la cascarilla de arroz a partir del contenido de humedad.

CONTENIDO DE HUMEDAD %	PODER CALORÍFICO INFERIOR (PCI) kJ/kg
0	19880
10	17644
20	15412
30	13180
40	10947
50	8715
60	6413

2.3 Punto de fusión y ensuciamiento de la ceniza de la cáscara de arroz.

El punto de fusión de las cenizas y el nivel de ensuciamiento son dos factores básicos a los que se les debe prestar especial atención al diseñar y durante la explotación de los sistemas de combustión que utilizan biomasa como combustible. Ambos aspectos, fusión y ensuciamiento, dependen de la composición química de la ceniza la cual varía de un residuo a otro, como se puede apreciar en la tabla 2.5 y 2.6.

Tabla 2.5 Composición mineral de las cenizas de cascarilla de arroz a nivel mundial

Parámetros %	California	
	V ₁ Cáscara	V ₂ Tallo
S ₁ O ₂	91,42	74,62
Al ₁ O ₂	0,78	1,04
T ₁ O ₂	0,02	0,09
Fe ₂ O ₃	0,14	0,85
CaO	3,21	3,01
MgO	< 0.01	1,75
Na ₂ O	0,21	0,96
K ₂ O	3,71	12,30
SO ₃	0,72	1,24
P ₂ O ₅	0,43	1,41
Total	100,00	100,00

Punto de fusión.

Como consecuencia del empleo de los Fertilizantes en los cultivos de la agricultura, la mayoría de los residuos agrícolas tienen en sus cenizas contenidos elevados de Óxidos de Potasio (K₂O). Los óxidos de potasio tienen un punto de fusión relativamente bajos y en la medida que aumenta su proporción, el valor de la temperatura de fusión disminuye. Sin embargo, la ceniza de la cáscara de arroz se caracteriza por tener un bajo contenido de óxidos de potasio K₂O = 3.71 %, pero la ceniza del Tallo de la planta de arroz tiene un mayor contenido de óxidos de potasio K₂O = 12. 30 %. Por otro lado, la ceniza obtenida al quemar tanto la cáscara como el tallo de arroz, tienen un alto contenido de óxidos de sílice S₁O₂ = 91.42 y 74.67 %, respectivamente. El punto de fusión del óxido de silicio

es relativamente alto (1450 °C). Por estas razones lo normal es que al quemar cáscara de arroz no deben presentarse los problemas de la escorificación por bajo punto de fusión de sus cenizas y algunas investigaciones plantean que la temperatura de fusión de la ceniza de la cáscara de arroz está alrededor de los 1500 °C, siendo un poco menor para la ceniza de los tallos al tener estos mayor contenido de compuestos alcalinos.

Ensuciamiento.

El termino ensuciamiento se refiere a los depósitos que se acumulan sobre la superficie de transferencia de calor con las cuales se ponen en contactos los gases de la combustión. El ensuciamiento frecuentemente se asocia, en sentido general, con la reducción de la velocidad de transferencia de calor y la corrosión. Al quemar la cáscara de arroz lo usual es que se produzca una ceniza muy fina, la cual es fácilmente arrastrada, fuera de la cámara de combustión, con los gases producidos. Esta ceniza puede ser separada y colectada mediante el empleo de ciclones separadores o filtros de manga.

El “Índice de Álcali” se utiliza para evaluar la tendencia de los combustibles a producir ensuciamiento cuando se queman. Este índice relaciona la masa de óxidos metálicos (K₂O más Na₂O), presentes en la ceniza con los generados térmicamente. Algunos investigadores señalan que:

- Para índice de álcali mayor que 0.17 Kg/GJ el ensuciamiento es probable.
- Para índice de álcali por encima de 0.34 kg/GJ es casi seguro que ocurra ensuciamiento.

Tabla 2.6 Índice de Álcali

Índice de Álcali, Kg/GJ	Material
1.75	Corteza de almendra
1.64	Tallo de arroz
1.10	Paja de trigo
0.50	Cáscara de arroz
0.07	Carbón bituminoso

El Índice de Álcali, puede ser útil como una indicación de los problemas que se tendrán con la ceniza. Esto fundamenta el criterio que al quemar la cáscara para producir el calor del Proceso de Secado del grano, sus gases no se pueden poner en contacto directo con el arroz cáscara pues lo puede

contaminar. El alto contenido de ceniza de la cascarilla de arroz y las características de su ceniza imponen severos requerimientos sobre el diseño de los sistemas de combustión.

2.4 Cantidad de cascarilla producida por la empresa.

Para obtener la cantidad de cascarilla producida por la empresa tomaremos como muestra todo el arroz que procesó la empresa en un año, como en el presente año estamos en el primer semestre se tomara la del año anterior (2017-2018).

La empresa procesó una cantidad estimada en 12342.871 toneladas de arroz dando así una cantidad de 2715.431 toneladas de cáscara de arroz.

2.4.1 Energía producida por la cantidad de cascarilla producida por la empresa.

Para calcular la energía total (*Ettotal*) que se puede producir con la cascarilla del arroz se utiliza la ecuación siguiente. (En la empresa el arroz es secado hasta entre un 8% y un 10% de humedad, con la ayuda de la Tabla 2.4 tenemos el PCI para 10% de humedad)

$$Ettotal = Caprd * PCI$$

Caprd _ cáscara producida

$$Ettotal = 2715431 \text{ Kg} * 17644 \text{ KJ/Kg}$$

PCI _ poder calórico inferior

$$Ettotal = 47911064564 \text{ KJ} = 47,9 * 10^9 \text{ KJ} = 13308629 \text{ KWh}$$

¿Será suficiente la cantidad de cascarilla, para ser usada como combustible para secar todo el arroz procesado en ese año?

Bueno, según la experiencia de otras secadoras de arroz que trabajan con la cascarilla como biomasa utilizando un horno y en bibliografías, se necesita de (84-112) Kg de cáscara de arroz para secar una tonelada de arroz, esta cantidad de masa de combustible varía dependiendo del porcentaje de humedad de la biomasa y su variedad.

La empresa secó ese año (2017-2018), 12342.871 toneladas de arroz. Calculamos.

2.4.2 Cantidad de cascarilla de arroz (CA) necesaria para el secado de la producción del año en kilogramos (Kg).

Tomaremos 112 kg CA por 1 tonelada de arroz (A) a secar para simular un máximo consumo de combustible.

$$\text{Cantidad de cascarilla} = \text{Cantidad de Arroz a secar} * (112) \text{ Kg CA} / \text{ton A}$$

$$\text{Cant casc} = 12342.871 \text{ ton A} * 112 \text{ Kg CA} / \text{ton A}$$

$$\text{Cant casc} = 1382401.552 \text{ Kg CA} = 1382.406 \text{ toneladas CA}$$

Como la cantidad de cascarilla que se produce en la empresa es 2715.431 ton, si es rentable utilizar la cascarilla como combustible pues alcanza para secar todo el arroz a secar, representando un 50.9% del total de cáscara de arroz y quedado un 49.1% libre para otros usos, como combustibles u otros.

2.5 Ahorro de combustible.

Actualmente en la empresa se seca el arroz que entra en la empresa con la ayuda de un quemador de diésel (figura 2 de anexos). A partir de la experiencia de los trabajadores que operan en el área de secado, para secar una tonelada de arroz se necesita aproximadamente entre 15-16 litros de diésel. Si calculamos:

Cantidad de diésel necesario para el secado de ese año y pudiese ahorrarse:

$$\text{Cant diésel} = \text{Cantidad de Arroz a secar} * (15-16) \text{ l diésel/ton A}$$

$$\text{Cant diésel} = 12342.871 \text{ ton A} * 15 \text{ l diésel/ton A}$$

$$\text{Cant diésel} = 185143.065 \text{ l}$$

2.6 Análisis para el diseño del horno de combustión de la cáscara de arroz.

El diseño de un horno para la combustión de la cáscara de arroz en la empresa es posible y es de gran ayuda ambiental y económica. La cascarilla de arroz reúne todas las propiedades calóricas para la combustión y hay la suficiente cantidad con el fin de usarse como combustible para el secado del arroz y queda más para otros usos. Se ahorraría mucho por no usar diésel, como combustible, y al no quemar este combustible ayudaríamos al medioambiente y de igual forma eliminado la cascarilla que por sus cantidades excesiva es otro contaminante.

2.6.1 Selección del horno para la combustión de la cáscara de arroz.

En todas las bibliografías estudiadas, por las características de la cáscara de arroz, recomiendan para esta, la combustión en un horno de Lecho fluidizado burbujeante (LFB). En este tipo de horno gracias a la intención de aire provocada por los inyectores de la entrada del aire secundario la biomasa experimenta un estado de suspensión y turbulencia, que permite en contacto directo de cada partícula con el lecho (como se muestra en la Figura 2.1). Esto permite la gasificación y combustión correcta del combustible, siendo muy eficiente para este tipo de biomasa.

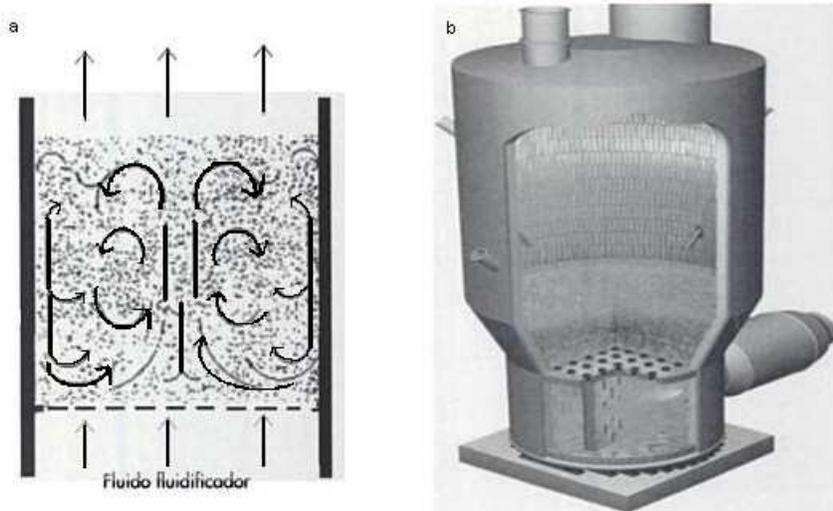


Figura 2.1 Horno de Lecho fluidizado

Análisis para la selección del horno a diseñar.

Sin embargo le es muy difícil a la empresa la construcción del diseño del horno Lecho fluidizado burbujeante, por su complejidad, se trata de tecnologías muy avanzadas lejos de cualquier alcance, ya que este horno necesita muchos sensores electrónicos para su correcto uso, además de ventiladores centrífugos de aire que logren el fluido necesario por los inyectores de la entrada secundaria. También se necesita un extractor de partículas quemadas en la superficie del horno para evitar la expulsión de estas a la atmosfera, provocada por el proceso de fluidización dentro de la cámara de combustión.

Estas y otras características de horno de LFB son lo que hace casi inválido su diseño, pero el principal objetivo de este tipo de horno para la cáscara de arroz, es su correcta gasificación y combustión, no lograda así con las otras variedades mostradas. Sin embargo con la inclusión del principio de multitubularidad en un horno común (horno de combustión de lecho fijo) con el diseño de gasificadores dentro de la cámara de combustión, será posible la gasificación y combustión completa de la cáscara de arroz.

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

Los combustibles sólidos al igual que los líquidos, se agrupan por sus cualidades y ello responde en primer lugar, a la facilidad de los mismos de gasificarse y en segundo lugar, a su capacidad de dar respuesta a los requisitos de la combustión, según la aplicación específica. Cuando un combustible líquido se considera pesado, se refiere a un combustible con dificultades en gasificar, con un bajo índice de inflamación (Elevado tiempo de ignición), lo que hace necesario el precalentamiento para

su garantía, además de requisitos adicionales, vinculados a una compleja y costosa tecnología para el aseguramiento aceptable de la combustión. Los combustibles sólidos y en particular los que provienen de las biomásas residuales no leñosas no son ajenos a las dificultades precedentes, sobre todo cuando se queman en pila de capa gruesa o en forma de briquetas macizas de medianas y grandes dimensiones y altas densidades, en hornos térmicamente ineficientes, donde las temperaturas del ambiente de combustión resultan inferiores a 700°C.

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

En estudios obtenidos se puede observar que la influencia de la densidad de las briquetas no es significativa, lo que resulta de gran ventaja, por cuanto las exigencias en la densificación no constituyen limitante para que las briquetas funcionen bien en la combustión, incluso en condiciones naturales de las biomásas (Sin densificar), siempre que se asegure la macro multitubularidad en la pila dentro del horno. (Infante, 2010).

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

La esencia del proceso de gasificación queda 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 ($\lambda_{eq} = \frac{d}{D} eq$), este factor representa la multitubularidad, por cuanto en el volumen de combustible sólido, existirá un conveniente número de conductos de dimensiones medibles o no, que satisfagan la magnitud del factor (λ_{eq}), nunca inferior al 30% y ello asegura que la distancia relativa entre los

mismos ($\beta < 2$), posibiliten un proceso de gasificación espontáneo y semejante al que ocurre en la naturaleza, para este propósito, se debe provocar la macro multitubularidad, ya sea por la organización del combustible sólido en la pila dentro de la cámara de combustión (Leña, carbón, briquetas macizas o multitubulares) o por la creación artificial de dispositivos de gasificación que conectados con la parrilla del combustible, aseguran la macro multitubularidad deseada (combustibles sin densificar con cualquier grado de granulometría), es importante señalar que los dispositivos de gasificación o gasificadores, constituyen la opción más integral y generalizadora de formación de una tecnología para la gasificación-combustión de cualquiera de los estados en que se encuentren las biomásas, con elevados valores de los índices fundamentales de combustión. (Infante, 2011).

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

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

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

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).

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

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

Donde:

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

$z \Rightarrow$ Número de gasificadores.

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

Tenga presente que resulta más favorable un elevado número de gasificadores ($z1$) 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.

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

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

$$\delta = \frac{A_{secund.}}{A_{gasif}}$$

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

Experimentalmente se demostró que a partir de $\delta = 0,85$ el proceso de gasificación- combustión de los gases no tuvo dificultades, sin embargo el aseguramiento incondicional del proceso de gasificación se logró con estrangulación del aire de alimentación en una magnitud inferior al 20%, lo

que corresponde a reducir la sección del conducto en esa magnitud, para las condiciones del fogón objeto de experimento.

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

Conclusiones del Capítulo II.

1. La cáscara de arroz a partir propiedades físicas-químicas y su poder calórico puede ser utilizada como un combustible.
2. La cantidad de cáscara producida por la empresa es lo suficiente como para ser utilizada como combustible en un horno de combustión para el secado del grano.
3. El concepto de multitubularidad se puede aplicar a cualquier combustible sólido utilizado.
4. El proceso de gasificación puede ser regulado regulando el aire de alimentación.
5. Se seleccionó el horno de Lecho fijo para el diseño con la inclusión del principio de multitubularidad a partir de gasificadores en la cámara de combustión.

Capítulo III

Diseño de horno para la combustión de la cáscara de arroz
aplicando el principio de multitubularidad.

Capítulo III: Diseño de horno para la combustión de la cáscara de arroz aplicando el principio de multitubularidad.

3.1 Análisis para el diseño.

Para el diseño del horno de combustión tenemos que tener en cuenta para que será usado y así tener en cuenta la energía a producir; en este trabajo se diseñará con el objetivo de secar todo el arroz producido en la Empresa de Granos de Aguada de Pasajeros.

Entonces:

La empresa produjo el año anterior una cantidad de 12342.871 toneladas de arroz a secar; si dividimos entre los 365 días del año y las 24 horas del día, tenemos como resultado que nuestro horno tendrá que secar aproximadamente 1.5 ton/h y en base a este resultado se hará el diseño.

3.1.1 Determinación del volumen de producto a secar por hora.

$$V = m / \delta$$

$$V = 2.38 \text{ m}^3$$

En dicha ecuación:

V _ Volumen del arroz cáscara (m^3)

m _ Masa del arroz cáscara (1500 kg)

δ _ Densidad aparente del arroz cáscara (629.24 kg/m^3)

3.1.2 Cálculo de la cantidad de agua a remover de los granos.

El porcentaje de humedad con que el arroz cáscara entra del campo al secadero según la empresa y con el objetivo de diseñar para las peores condiciones de explotación se considera que es de un 28%.

$$m_w = m_m \cdot (\phi_i - \phi_f) / (1 - \phi_f / 100)$$

$$m_w = 300 \text{ kg}$$

En dicha ecuación:

m_w _ La cantidad de agua a remover (kg)

m_m _ Masa de granos a secar (1500 kg)

ϕ_f _ Humedad final del arroz 10%

3.2 Cantidad de aire necesario que entrará al horno para la combustión.

$$V_a = \alpha_H \cdot \left[0,0889 \cdot (C^t + 0,375 \cdot S^t) + 0,265 \cdot H^t - 0,0333 \cdot O^t \right] \quad (m^3/kg_{CA})$$

$$V_a = 4.34 \text{ m}^3/\text{Kg CA}$$

Donde:

V_a _ aire necesario para la combustión

α_H _ coeficiente de exceso de aire (1.55)

El coeficiente de exceso de aire (α_H) valor fijado para el uso de combustibles sólidos en Cuba.

3.2.1 Cantidad de ceniza de cáscara de arroz obtenida por masa de cáscara de arroz quemada.

$$C = (1 - \alpha_{arr}) \cdot \frac{A^t}{100} \quad (kg_{CCA}/kg_{CA})$$

$$C = 0.1699 \text{ Kg CCA/Kg CA}$$

Donde:

A^t _ porcentaje de ceniza Tabla 2.2 (17.89 %)

α_{arr} _ coeficiente de arrastre de las cenizas por los gases de escape (0.05) (Warnatz, 2006)

3.3 Pérdidas de calor en el horno y eficiencia.

Las pérdidas de calor por incombustión química (q_3) y las pérdidas de calor por incombustión mecánica (q_4) en el horno serán estimadas mediante tablas teórico-experimentales (Warnatz, 2006) que recomiendan valores porcentuales de pérdidas, según el tipo de combustible y el modo de combustión de la biomasa. Las pérdidas por transferencia de calor (q_5) en el horno se estimarán mediante las expresiones de Nusselt, correspondientes a la transferencia de calor por convección y las ecuaciones que rigen la transferencia de calor por radiación dentro de la cámara de combustión

del horno, mientras que las pérdidas de calor por las cenizas extraídas del horno (q_6) se evaluarán mediante la ecuación:

$$q_6 = \frac{a_{esc} \cdot h_{ceniza} \cdot A^t}{Q_d} \quad (\%)$$

$$q_6 = 0.79 \%$$

Donde:

a_{esc} la fracción de cenizas que no arrastran los gases de escape

$$a_{esc} = 1 - a_{arr}$$

h_{ceniza} — entalpía de las cenizas (821.05 kJ/kg ceniza)

Q_d — poder calórico de la cascarilla a 10 % de humedad Tabla 2.4.

Entonces:

$$q_3 = 0.70 \%$$

$$q_4 = 6 \%$$

$$q_5 = 5.76 \%$$

La eficiencia total del horno (η_{HORNO}).

$$\eta_{HORNO} = 100 - (q_3 + q_4 + q_5 + q_6) \quad (\%)$$

$$\eta_{HORNO} = 86.75 \%$$

Calor útil (Q_U)

$$Q_U = Q_d \cdot \left(\frac{\eta_{HORNO}}{100} \right) \quad (\text{Kj/kgCA})$$

$$Q_U = 15306.17 \text{ KJ/Kg CA}$$

3.4 Cálculo del flujo de combustible.

$$\dot{m}_{ca} = Q_u / PCI_{ca}$$

$$\dot{m}_{ca} = 15306.17 \text{ KJ/Kg CA} * 112 \text{ Kg CA/hora} / 17644 \text{ KJ/Kg}$$

$$\dot{m}_{ca} = 97.16 \text{ Kg CA/ h}$$

$$\dot{m}_{ca} = 0.027 \text{ Kg CA/ s}$$

Donde:

\dot{m}_{ca} _ flujo de combustible

Q_u _ calor útil (15306.17 KJ/Kg CA)

PCI_{ca} _ poder calórico inferior de la CA para 10% de humedad (17644 KJ/Kg)

3.5 Volumen de cámara de combustión.

El volumen de la cámara de combustión (V_{cc}) se tiene como la suma del volumen de los gases proveniente de la quema (V_g), lo cual se determine como el volumen de gases producido por cada kW de calor producido por el calor generado en la cámara de combustión y el volumen de la ceniza de la combustión ($V_{cenizas}$).

$$V_{cc} = V_g + V_{cenizas}$$

En la ecuación:

$$V_g = 600 \text{ cm}^3/\text{KW} * (Q_u * \dot{m}_{ca}) \text{ KW}$$

$$V_g = 247800 \text{ cm}^3$$

El volumen de las cenizas lo calcularemos para removerla en una hora, ya sea manual o con transportador de tornillo sinfín.

$$V_{cenizas} = \frac{\dot{m}_{ca} * 1 \text{ h}}{\rho_{CCA}}$$

$$V_{cenizas} = 42801.76 \text{ cm}^3$$

Donde:

ρ_{CCA} _ densidad de la ceniza de cascarilla de arroz ($2.27 \times 10^{-3} \text{ Kg/cm}^3$)

Entonces:

$$V_{cc} = 290601.76 \text{ cm}^3 = 0.2906 \text{ m}^3$$

Si aproximamos:

$$V_{cc} = 0.30 \text{ m}^3$$

Asumiendo largo de la cámara de combustión:

$L = 1.2 \text{ m}$ entonces, ancho (A) y altura (H) serán:

$$A = 0.8 \text{ m}$$

$$H = 0.5 \text{ m}$$

Dando como volumen real $V_{real\ cc} = 0.48 \text{ m}^3 > V_{cc}$, por lo que se acepta ya que este V_{cc} es el mínimo que puede tener para la combustión.

3.5.1 Tolva alimentadora del horno.

Para el sistema de alimentación de cascarilla de arroz hacia el horno, se utilizara el diseño de tolva alimentadora realizado, el cual utiliza un transportador de tornillo sinfín que introduce la cascarilla hacia la parrilla para su posterior quema en el hogar.

Volumen de tolva de alimentadora (V_{ta}) para tres horas de explotación sin volver a llenar:

$$V_{ta} = \dot{m}_{ca} * 3h / \rho_{Ca} \quad \rho_{Ca} \text{ _ densidad de la cáscara de arroz (100 Kg/m}^3\text{)}$$

$$V_{ta} = 2.92 \text{ m}^3$$

Aplicando la fórmula de pirámide truncada y asumiendo el área de la base inferior (B_1) y la superior (B_2), podemos calcular la altura de la tolva.

$$V_{ta} = h/3(B_1 + B_2 + \sqrt{B_1 * B_2})$$

3.6 Metodología para el dimensionado de los dispositivos de gasificación.

1. Elección de los coeficientes $\lambda_{eq} = \frac{A_{gasif}}{A_{cám}} = (0.3:0.7)$ y $\delta = \frac{A_{secund}}{A_{gasif}} = (0.85:2)$.

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

3.6.1 Principio de la macro multitubularidad.

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

La parrilla con la biomasa y gasificadores organizados convenientemente contribuye en el aseguramiento del proceso de gasificación-combustión, de ahí la necesidad de determinar convenientemente las siguientes relaciones $\lambda = \frac{d}{D} eq$ y $\delta = \frac{A_{secund.}}{A_{gasif}} = (0.85 : 2)$.

convenientemente las siguientes relaciones $\lambda = \frac{d}{D} eq$ y $\delta = \frac{A_{secund.}}{A_{gasif}} = (0.85 : 2)$.

Área de la cámara de combustión ($A_{cám}$):

$$A_{cám} = L * A = (1.2 * 0.8) \text{ m}$$

$$A_{cám} = 0.96 \text{ m}^2$$

Área de gasificación.

$$A_{gasif} = (0.3 : 0.7) \cdot A_{cám}$$

$$A_{gasif} = 0.67 \text{ m}^2$$

3.6.2 Calculo del número de gasificadores y del área perimetral de un gasificador.

Área perimetral de un gasificador.

$$A_{perimetral} = H * d * \pi$$

$$A_{\text{perimetral}} = 0.157\text{m}^2$$

Donde:

H _ altura del gasificador (0.4m)

D _ diámetro del gasificador (0.1m)

Cálculo del índice de combustión promedio (ICP).

$$ICP = \frac{|\Delta W|}{\Delta t} = \frac{\psi \cdot W_{total}}{\Delta t}$$

$$ICP = 1061 \text{ g/min}$$

Donde:

ΔT _ Tiempo completo de la combustión (60 min)

$\Delta W = \Delta W_0 - \Delta W_f$ _ (Masa inicial menos masa final) (63660 g)

Utilizando la ecuación para (biomasa no leñosa).

$ICP = 90.31 \cdot A_{\text{gasif.perim}} + 10.69 \Rightarrow$ Para biomasa no leñosas (Cáscara de Café, cáscara de arroz etc.).

$$A_{\text{gasif.perim}} = \frac{ICP - 10.69}{90.31}$$

$$A_{\text{gasif.perim}} = 11.62 \text{ m}^2$$

Hallar el número de gasificadores.

$$n_{\text{gasificadores}} = \frac{A_{\text{gasif.per total}}}{A_{\text{perimetral}}}$$

$$n_{\text{gasificadores}} = \frac{11.62}{0.157} = 74 \text{ gasificadores}$$

Aire secundario.

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

$$A_{\text{secund}} = 0.57 \text{ m}^2$$

3.7 Dimensiones de la chimenea.

El horno tendrá tiro natural o atmosférico y la altura mínima de diseño de la chimenea (H_o) se calculará mediante la fórmula representada en la siguiente ecuación. Este método depende de los requisitos de contaminación atmosférica por dilución de humos y ha sido adoptado por legislaciones de muchos países, que abogan por una reducción del límite máximo permisible de concentración de contaminantes del aire a nivel del suelo.

$$H_o = \sqrt[3]{A \cdot Q \cdot F \cdot \frac{\sqrt[8]{\frac{n}{V \cdot \Delta T}}}{C_{MAX}}} \quad (m)$$

$$H_o = 6.40 \text{ m}$$

Donde:

A es un parámetro adimensional que refleja las condiciones climatológicas ($A = 2\,505,95$), Q es el flujo másico máximo de sustancias contaminantes permitido ($Q = 146 \text{ kg/h de CO}_2$), F es un coeficiente adimensional relacionado con la velocidad de sedimentación de las impurezas a la atmósfera ($F = 1$), n es el número de chimeneas ($n = 1$), V es el flujo volumétrico de gases emitidos ($V = 1\,519 \text{ m}^3/\text{h}$), ΔT es la variación de temperatura entre la base de la chimenea y el medio ambiente ($\Delta T = 580^\circ\text{C}$) y C_{MAX} es la concentración máxima de contaminantes recomendado ($C_{MAX} = 100 \text{ mg/m}^3$).

3.7.1 El diámetro de salida de la chimenea

Siendo u_C la velocidad de salida de los gases por la chimenea ($u_C = 2,5 \text{ m/s}$).

$$D_s = 1,128 \cdot \sqrt{\frac{V}{u_C}} \quad (m)$$

$$D_s = 0.42 \text{ m}$$

3.8 Diseño del intercambiador de calor

Determinación del flujo de aire de la cámara de secado. Para determinar el contenido de agua a evaporar realizamos un análisis termodinámico del proceso. Sabemos que el arroz tiene un

contenido inicial de humedad del 28%, y lo que se quiere es llevarlo a una humedad relativa de 12% que es ideal para el almacenamiento. Sin embargo no es recomendable hacer esta baja de una humedad en una sola pasada, ya que el grano tiende a presentar fisuras, y se recomienda por no bajar más de 9 grados por pasada ya que se tiene problemas durante el pilado. Es por esta razón que hacemos 2 pasadas una de 28% a 19% y la otra de 19% a 10% de humedad.

Primera pasada

La cantidad de agua a remover ya la habíamos calculado anteriormente ($m_w = 300 \text{ kg}$) que va a ser aproximadamente $m_w = 0.083 \text{ Kg H}_2\text{O/s}$.

Cantidad de H₂O absorbida.

Se escoge una temperatura promedio de 30°C y una humedad relativa de 90%, para la cual:

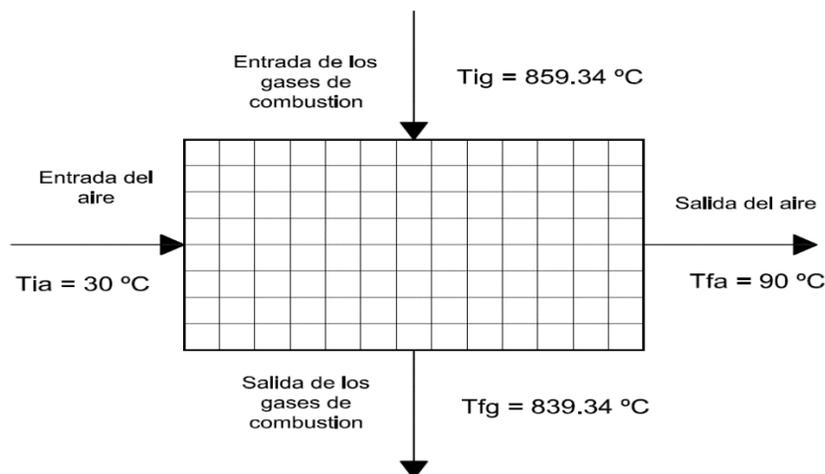
H₂O absorbida = 0.0039 Kg/Kg de aire seco

El flujo másico del aire (\dot{m}_{aire}) se puede hallar a partir de estos datos:

$$\dot{m}_{\text{Aire}} = \frac{0.083 \text{ Kg H}_2\text{O/s}}{0.0039 \text{ Kg/Kg de aire seco}} = 21.28 \text{ Kg/s}$$

Análisis de transferencia de calor. Para el análisis de transferencia de calor se realizara un análisis de energía y de masa. Definiremos en la Figura 3 las temperaturas iniciales:

Figura 3. Balance de energía.



Donde se asume una diferencia de temperatura de 20°C a la salida de los gases. A partir de estos datos se sacara la temperatura media y se interpolará el calor específico, viscosidad, número de Pradal, etc.

$$Q_{\text{aire}} = \dot{m}_{\text{Aire}} * C_{\text{pa}} * \Delta T_{\text{a}}$$

$$Q_{\text{aire}} = 1287.014 \text{ KJ/s}$$

Donde:

Q_{aire} _ calor transferido por el aire

C_{pa} _ calor especifico del aire (1.008 KJ/Kg °K)

ΔT_{a} _ variación de la temperatura del aire (60°K)

Haciendo un balance energético puedo calcular el flujo másico del gas:

$$Q_{\text{aire}} = Q_{\text{gas}}$$

$$\dot{m}_{\text{Gas}} = \frac{\dot{m}_{\text{Aire}} * C_{\text{pa}} * \Delta T_{\text{a}}}{C_{\text{pg}} * \Delta T_{\text{g}}}$$

$$\dot{m}_{\text{Gas}} = 55.33 \text{ Kg/s}$$

Donde:

\dot{m}_{Gas} _ flujo másico del gas

C_{pg} _ calor especifico de gas

ΔT_{g} _ variación de temperatura del gas

Prediseño del intercambiador de calor.

Se va a emplear el método LMTD (Diferencia de Temperaturas Media Logarítmica) y a partir de la fórmula de transferencia de calor vamos a definir las medidas que va a tener nuestro intercambiador de calor y el tipo de material a utilizar.

$$Q = F * U * A * \Delta T_{\text{lm}}$$

Donde:

Q _ carga térmica (Q va a ser $Q_{\text{aire}} = 1287.014 \text{ KJ/s}$)

F _ factor de corrección (F=1) Figura 5.19 Moncada.

U _ coeficiente de transferencia global

A _ área de contacto

ΔT_{lm} _ variación de la temperatura logarítmica (789.17 °K)

Con la ayuda de la Tabla 3.1 vamos a escoger el Intercambiador de calor de tubos, aire en flujo cruzado, con un valor medio de $U = 40 \text{ [W/m}^2\text{K]}$

Tabla 3.1 Valores del coeficiente de transferencia global.

Valores representativos del coeficiente global de transferencia de calor	
Combinación de fluidos	$U(\text{W/m}^2 \cdot \text{K})$
Agua con agua	850-1700
Agua con aceite	110-350
Condensador de vapor (agua en tubos)	1000-6000
Condensador de amoníaco (agua en tubos)	800-1400
Condensador de alcohol (agua en tubos)	250-700
Intercambiador de calor de tubos con aletas (agua en tubos, aire en flujo cruzado)	25-50

Obtenidos todos estos valores, podemos despejar el área y saber el área de contacto que va a necesitar el intercambiador de calor:

$$A = Q / F * U * \Delta T_{lm}$$

$$A = 40.8 \text{ m}^2$$

Entonces:

$$A = Nt * \pi * D_e * L$$

Donde:

Nt = Número de tubos, D_e = Diámetro exterior de la tubería, L = Longitud del tubo

Se utiliza una tubería para vapor cedula 40 ASTM A 53 GR B de las siguientes dimensiones: Diámetro nominal 3", Diámetro exterior 88.9mm, espesor 5,94mm y asumiendo una longitud de 1.2 metro de longitud de tubería nos queda:

$$Nt = A / \pi * D_e * L = 121.8 \text{ tubos} \approx 122 \text{ tubos.}$$

El número de tubos es muy grande, considerando que es un valor de prueba. Ahora se calcula el valor de Coeficiente de transferencia Global real (U_{real}).

$$U_{real} = 1/\sum R_{térmicas}$$

Donde las resistencias térmicas son:

$$\sum R_{térmicas} = R_{cv_{aire}} + Fouling_{int} + R_{cond} + Fouling_{ext} + R_{cv_{gas}}$$

$$\sum R_{térmicas} = 0.0178 [m^2K / W]$$

Sustituyendo en la fórmula de U_{real} :

$$U_{real} = 56.2 [W/m^2K]$$

Calculamos el Área real (A_{real}):

$$A_{real} = Q / F * U_{real} * \Delta T_{lm}$$

$$A_{real} = 29.02 m^2$$

Comparamos el A con el A_{real} y $A > A_{real}$ en (10 - 30) %. Esto se cumple por tanto se pasa al cálculo de número de tubos reales en 3 pasos.

Calculo de número de tubos reales (N_{treal})

$$N_{Treal} = \frac{A_{real}}{\pi * D_m * L} = \frac{29.02 m^2}{\pi * 0.0889 m * 1.2m} = 86.62 \approx 90 \text{ tubos}$$

$$N_{tubos_{1\ pase}} = \frac{N_{tubos}}{N_{pases}}, \text{ donde N pases es asumido (3).}$$

$$N_{tubos_{1\ pase}} = \frac{90}{3} = 30$$

Cálculo y selección del ventilador.

Ya calculamos el flujo másico de aire necesario para el sistema, ahora sacaremos el caudal de aire (Q_{aire}).

$$Q_{aire} = \dot{m}_{Aire} / \rho_{aire\ 40\ ^\circ C}$$

$$\text{Donde: } \rho_{aire\ 40\ ^\circ C} = 1.1181 \text{ Kg/m}^3$$

$$Q_{aire} = 19.03 m^3/s$$

Utilizando la fórmula del caudal (Q_{aire}) que relacione al área transversal (A) y a la velocidad (V).

$$Q = V * A$$

Se sabe que los valores para este tipo de cámara deben fluctuar entre 6 y 9 m/s, por lo que se asume una velocidad de 9 m/s. En base a esta velocidad y caudal calculado determinamos el área de la sección de incidencia del flujo para el correcto secado.

Perdidas de presión del sistema. El ventilador a seleccionar debe vencer todas las pérdidas existentes en el sistema de modo que el aire caliente pueda llegar a la masa de arroz para reducir la humedad del mismo. LA presión estática total es la suma de todas las caídas de presión teniendo como resultado.

$$\Delta P_s = 1.32 \text{ in de H}_2\text{O}$$

Se asume un 30% adicional en el valor total de las pérdidas por caída de presión correspondiente al intercambiador de calor.

$$\Delta P_s = 1.32 \text{ in de H}_2\text{O} * 1.30 = 1.72 \text{ in de H}_2\text{O} = 398.54 \text{ Pa}$$

Cálculo de la potencia del motor.

$$\varphi = \frac{Q * P_s (Pa)}{n}$$

$$\varphi = 14585 \text{ W} = 19.8 \text{ hp}$$

Entonces se selecciona un ventilador centrífugo que satisfaga estas características (φ y ΔP_s).

Conclusiones del Capítulo III.

1. El concepto de multitubularidad se puede aplicar a cualquier combustible sólido utilizado.
2. El proceso de gasificación-combustión puede ser controlado, regulando el aire de alimentación.
3. La inclusión de gasificadores dentro de la cámara de combustión permite la gasificación de la biomasa y su combustión.
4. Se obtuvo una metodología para el diseño de horno de lecho fijo que permitiera la gasificación de la biomasa dentro de la cámara de combustión.

Capítulo IV

Análisis preliminar del costo del horno de combustión de
cáscara de arroz.

Capítulo IV: Análisis preliminar del costo del horno de combustión de cáscara de arroz.

4.1 Análisis económico para el diseño del horno de combustión.

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

- El valor de las materias primas.
- Materiales auxiliares empleados en la fabricación del horno.
- La parte de los activos fijos tangibles que se transfieren en el producto en forma de depreciación.
- El valor de la energía consumida.
- Los gastos indirectos y otros gastos.
- Los gastos relacionados con el trabajo humano, que compensa los valores de los productos para sí.

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

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

4.2 Costo de materiales.

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

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

Tabla 4.1 Listado de Materiales.

DESIGNACIÓN	MATERIAL	UM	CUC	CANT.UTIL.	CUC
Tubo de Acero inoxidable 1200x90	Acero inox	UN	550.00	90	49500.00
Plancha 10x1500x4500	Acero 20	T	378.00	4	1512.00
Malla de Acero inoxidable	Acero inox	T	1452	0.93	1350.36
Costos Sub. - Total					52362.36

Costos de materiales auxiliares.

Durante el proceso de soldadura se utilizaron:

Tabla 4.2 Costo de Electrodo.

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

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

Tabla 4.3 Costo de Oxígeno y Acetileno.

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

4.3 Gasto en salario.

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

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

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

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

Tabla 3.4 Gasto de Salario.

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

4.4 Gasto generado por la amortización de los equipos.

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

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

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

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

Costo de Amortización.

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

Tabla 4.4 Amortización de Equipos.

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

4.5 Costo por el consumo de energía eléctrica.

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

Tabla 4.5 Gasto en Electricidad.

EQUIPO	HORAS DE TRABAJO	GASTO EN HORAS	ENERGÍA CONSUMIDA (kW-h)	COSTO TOTAL (CUC)
Rectificador de Soldadura	10	32.00	320	28.8

Torno	5	12.97	64.85	5.83
Total				34.63

4.6 Total de gastos directos.

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

$$\text{Gastos Directos} = 52362.36 + 9.57 + 25.3 + 38.16 + 34.63 = 52470.02 \text{ CUC}$$

$$\text{Gastos Directos} = 138.42 = 138.42 \text{ PESOS}$$

4.6.1 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.

$$\text{Gastos Indirectos} = 0.3 \times \text{Gastos Directos} = 0,3 * 52470.02 = 15741.006 \text{ CUC.}$$

$$\text{Gastos Indirectos} = 0.3 \times \text{Gastos Directos} = 0.3 * 138.42 = 41.526 \text{ PESOS.}$$

4.7 Costo total de fabricación del horno.

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

$$\text{Costo de Fabricación CUC} = \text{G.D} + \text{G.I} = 52470.02 + 15741.006 = 68211.026 \text{ CUC.}$$

$$\text{Costo de Fabricación PESOS} = \text{G.D} + \text{G.I} = 138.42 + 41.526 = 179.95 \text{ PESOS.}$$

Según el cálculo estimado del costo de fabricación de horno gasificador es de 68211.026 CUC y 179.95 PESOS. Si se utilizan los materiales adquiridos en lugares de sus ventas para la fabricación del mismo. Como lo fundamental para que esta tecnología funcione apropiadamente, se centra en la cámara de combustión y parilla con gasificadores, si puede reducir el costo utilizando materiales metálicos de desechos o chatarras y materiales de construcción disponibles en lugar de construcción.

Conclusiones del Capítulo IV:

1. Rápida recuperación de la inversión, dado a que pueden ser utilizado combustibles sin costo agregado; con el ahorro del combustible que normalmente ellos quemaban en solo un trimestre se recupera la inversión.
2. Posibilidad del diseño de adecuarse a los requerimientos y disponibilidad financiera de los usuarios.
3. Los resultados obtenidos en el presente estudio demuestran que la inversión es factible económicamente y constituye un objetivo social y de protección del medio ambiente, con un interés de la humanidad.

Conclusiones Generales.

1. La utilización de biomásas como combustible es de mucha importancia por su sostenibilidad económica y medioambiental, la cáscara de arroz por su alto nivel calórico y características físicas resulta muy eficiente como combustible.
2. Utilizando la multitubularidad como principio básico se desarrolló una metodología para diseñar horno gasificador de combustibles sólidos, que puede ser generalizada su aplicación a cualquier tipo de tecnología de combustión - gasificación.
3. El modelo físico matemático de la pérdida de masa en el tiempo (el ICP) es esencial para determinar la masa de gases combustibles que se generan en un determinado combustible sólido, en función de su multitubularidad.
4. Existirá una rápida recuperación de la inversión, dado a que pueden ser utilizados combustibles sin costo agregado.

Recomendaciones.

- Se debe continuar con el estudio de la cáscara de arroz como combustible por su gran importancia en la economía y en el medioambiente.
- Se debe tener en cuenta que al quemar cascarilla de arroz hay que tener un control sobre la temperatura de fusión de la ceniza la cual no debe sobrepasar los 1500°C, para evitar el ensuciamiento de las paredes internas del horno y la corrosión.
- Instalación de medidores de temperatura en la cámara de combustión y en la salida del intercambiador.
- Continuar el estudio con la ceniza producida por la combustión de la cascarilla ya que tienen muchos usos en la agricultura, fundición, fabricación de cementos, etc.

Bibliografía.

- Acosta, A. (1992). *Energía, Medio Ambiente Y Desarrollo Sustentable*. (Friedrich Ebert).
- Armas, Y. (2015). *Diseño de Horno utilizando el principio de la Multitubularidad del combustible sólido* (tesis de pregrado). Universidad Carlos Rafael, Cienfuegos, Cuba.
- Belo, M. (2014). *Diseño de fogón utilizando el principio de la multitubularidad del combustible sólido* (tesis de pregrado). Universidad Carlos Rafael, Cienfuegos, Cuba.
- Carrasco, J. E. (2008, marzo 22). *Estado actual y perspectivas de las biomásas como recurso energético*. Recuperado a partir de www.coiim.es/C13/ENE-FEB2008/Document%20Library/pag.3.pdf
- Collective Authors. (1990). *The briquetting of agricultural waste for fuel*.
- Collective Authors. (1995). *Green Pease International, Power to chance*. Green Pease.
- Curvelo, J. A. (2017). *Evaluación preliminar del potencial de las diferentes biomásas de la provincia de Cienfuegos* (tesis de pregrado). Universidad Carlos Rafael, Cienfuegos, Cuba.
- Díaz P.L. (2015). Diseño de un horno para calentar empleando la cascarilla de arroz como combustible. *Artículo Original*. Recuperado de <http://www.Diseño%20de%20un%20horno%20para%20calentar%20aire%20empleando%20la%20cascarilla%20del%20arroz%20como%20combustible.html>
- Errasti, M. (2015). Diseño de un sistema para el aprovechamiento integral de la cáscara de arroz. *Mi SciELO*, 36(1). Recuperado de <http://www.Diseño%20de%20un%20sistema%20para%20el%20aprovechamiento%20integral%20de%20la%20cáscara%20de%20arroz.html>
- González, M. M. (2002). *Estudio teórico sobre la combustión heterogénea. Aplicación a la combustión de biomasa* (tesis de grado). Universidad de Vigo. España.
- Incropera, F. P. (1999). *Fundamentos de transferencia de calor*. México: Prentice Hall.

- Infante, C. (2010). *Evaluación térmica de prototipo de estufas eficiente, para diferentes biomasas* (tesis de pregrado). Universidad Carlos Rafael, Cienfuegos, Cuba.
- Mencía, V. (2011). *Metodología para el diseño de tecnologías de combustión de biomasas en pila de capa gruesa con gasificadores, empleando la Multitubularidad Natural o Provocada*. Universidad de Cienfuegos.
- Toscano, L. A. (2013). Análisis de los parámetros y Selección de hornos para la combustión de biomasa. *Revista Tecnológica ESPOL*, 13(2).
- Valverde, A., Sarria, B. y Monteagudo J. P. (2007). Análisis comparativo de las características fisicoquímicas de la cascarilla del arroz. *Scientia et Technica Año XIII*, (No 37), 255-260.
- Valverde, A. (2006). *Estudio sobre el uso de la cascarilla de arroz en los molinos del Departamento del Tolima* (tesis de maestría). CEEMA, Universidad Carlos Rafael, Cienfuegos, Cuba.
- Warnatz, J. (2006). *Combustion: Physical and Chemical Fundamentals, Modeling and Simulation, Experiments, Pollutant Formation*. 4th. ed., Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, ISBN: 978-3-540-25992-3.

Anexos.

Figura 1. Cascarilla de arroz.



Figura 2. Quemador de diésel.



Tabla 1. Análisis de la Cascarilla de arroz a nivel Mundial.

Parámetros	Canadá				California		China
	v ₁	v ₂	v ₃	v ₄	V _i	V _T	V ₁
C	37,60	42,10	38,70	42,60	38,83	38,24	37,60
H	5,42	4,98	4,70	5,10	4,75	5,20	5,78
O	36,56	33,66	31,37	33,44	35,47	36,26	37,62
N	0,38	0,40	0,50	0,51	0,52	0,87	1,88
S	0,03	0,02	0,01	0,02	0,05	0,18	0,09
Cl	0,01	0,04	0,12	0,13	0,12	0,58	0,00
Ceniza	20,00	18,80	24,60	18,20	20,26	18,67	16,93
Total	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Poder calórico Mj/Kg.	14,22	13,24	13,40	14,12	-	-	13,40

Tabla 2. Estadística acumulada hasta diciembre (1 año)

INDICADORES	NACIÓN								
	U/M	DICIEMBRE							
		Estatal	st. Taich	SCC	Total	Estatal	Est. Taich	SCC	Total
Cascara Molinada				1150.467	1150.467			12342.871	12342.871
Producción de consumo				756.267	756.267			8145.145	8145.145
Exceso de partido no mezc.				10.750	10.750			27.700	27.700
Rend, Industrial Total									
Rend, Industrial Consumo				66.70	66.70			66.00	66.00
Rend, en salvado				9.20	9.20			9.50	9.50
Rend, en cabecilla				2.00	2.00			1.70	1.70
Rend, en cascara				22.10	22.10			22.80	22.80
Existencia de arroz partido									0.000
Mezclas de arroz consumo	ton			756.267	756.267			8145.145	8145.145
Arroz al 4%	ton				0.000				0.000
Arroz al 10%	ton			688.013	688.013			2635.508	2635.508
Arroz al 20%	ton			68.254	68.254			5509.637	5509.637
Arroz al 30%	ton				0.000				0.000
Integral	ton								

Figura 3. Plano de la base de horno.

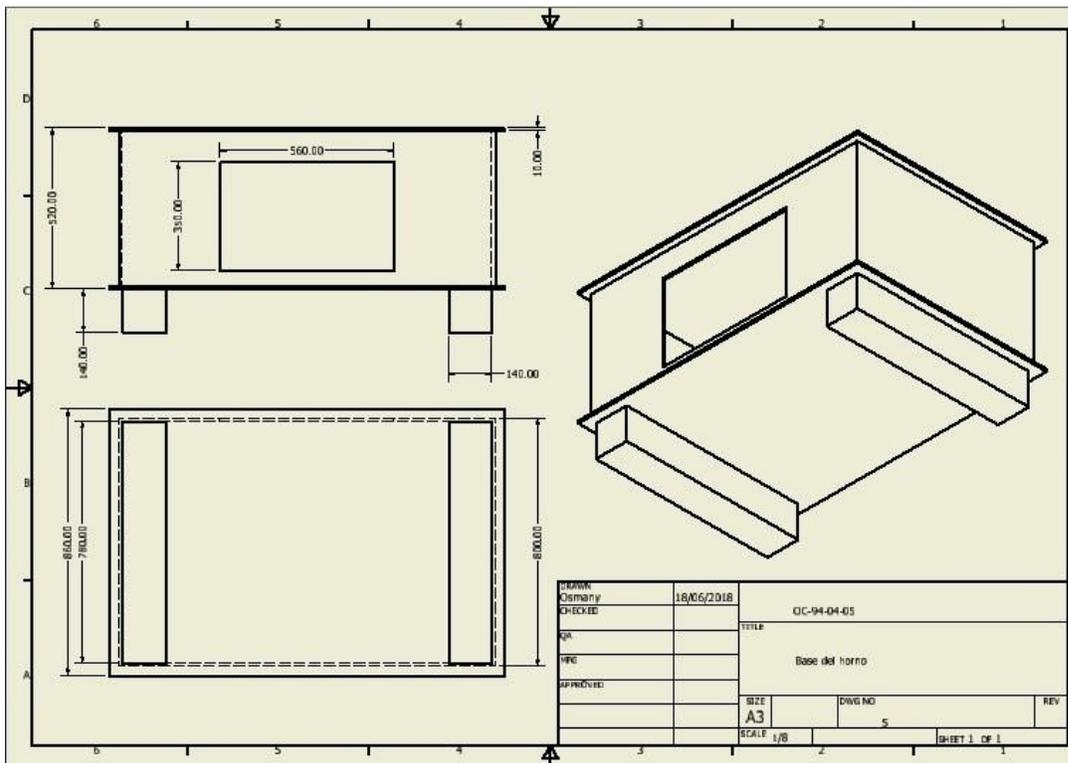


Figura 4. Plano de la cámara de combustión.

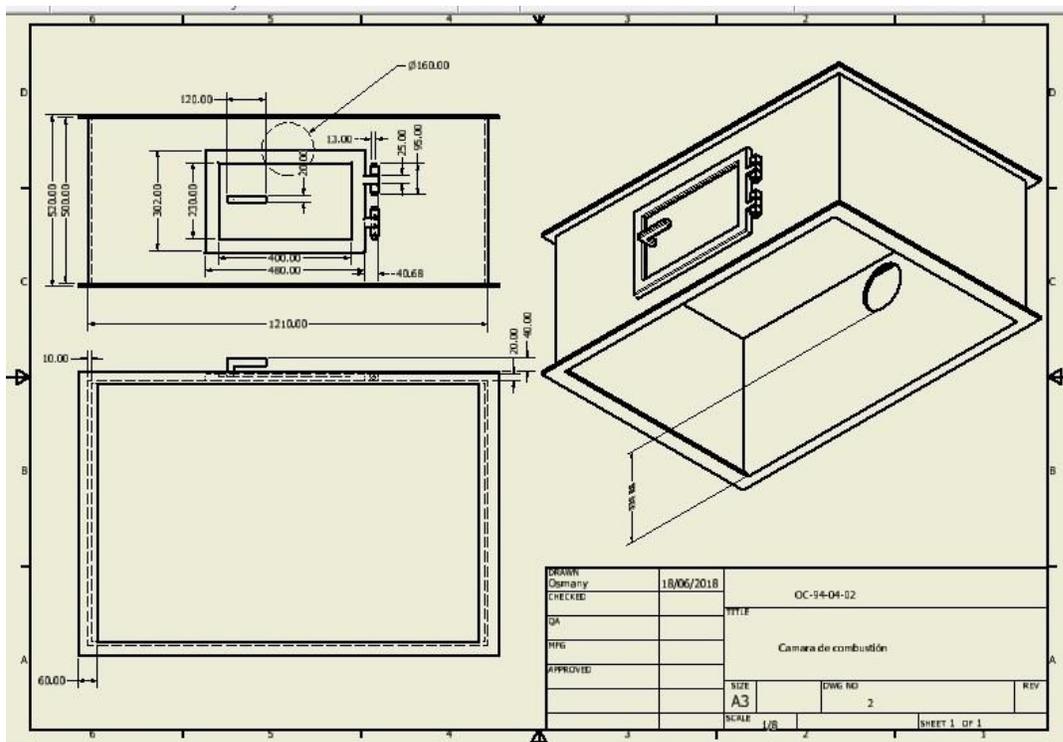


Figura 5. Plano de parrilla.

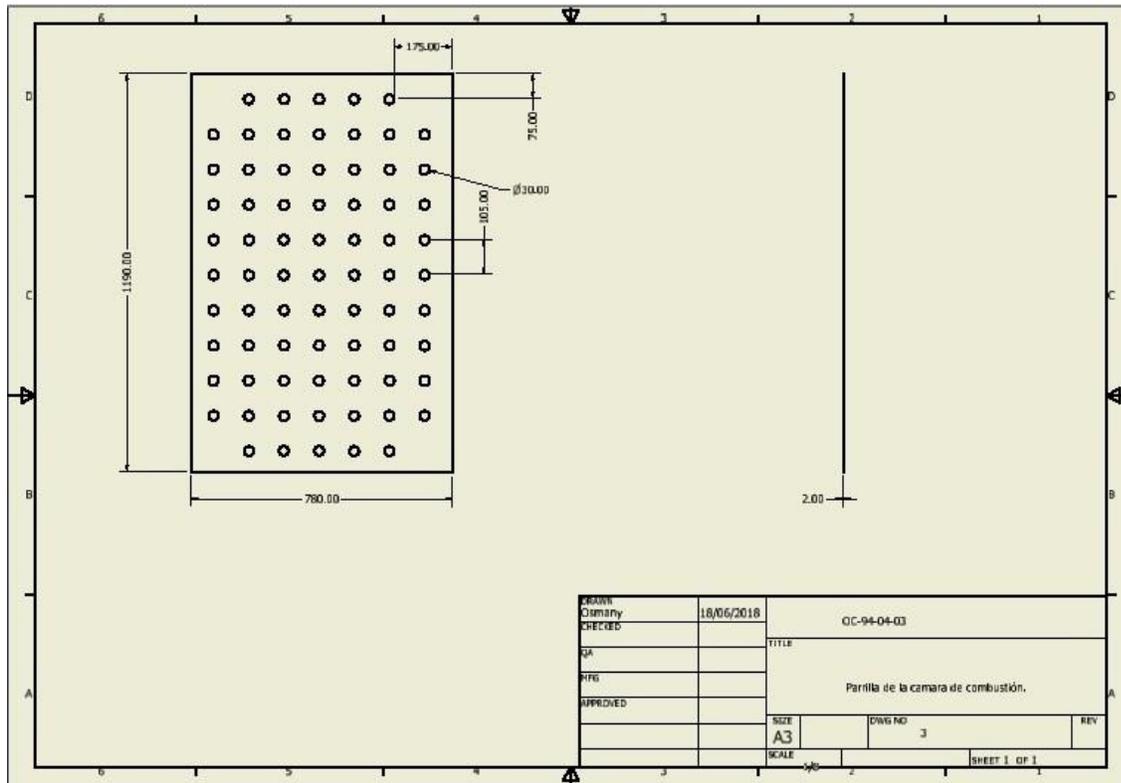


Figura 6. Plano del gasificador.

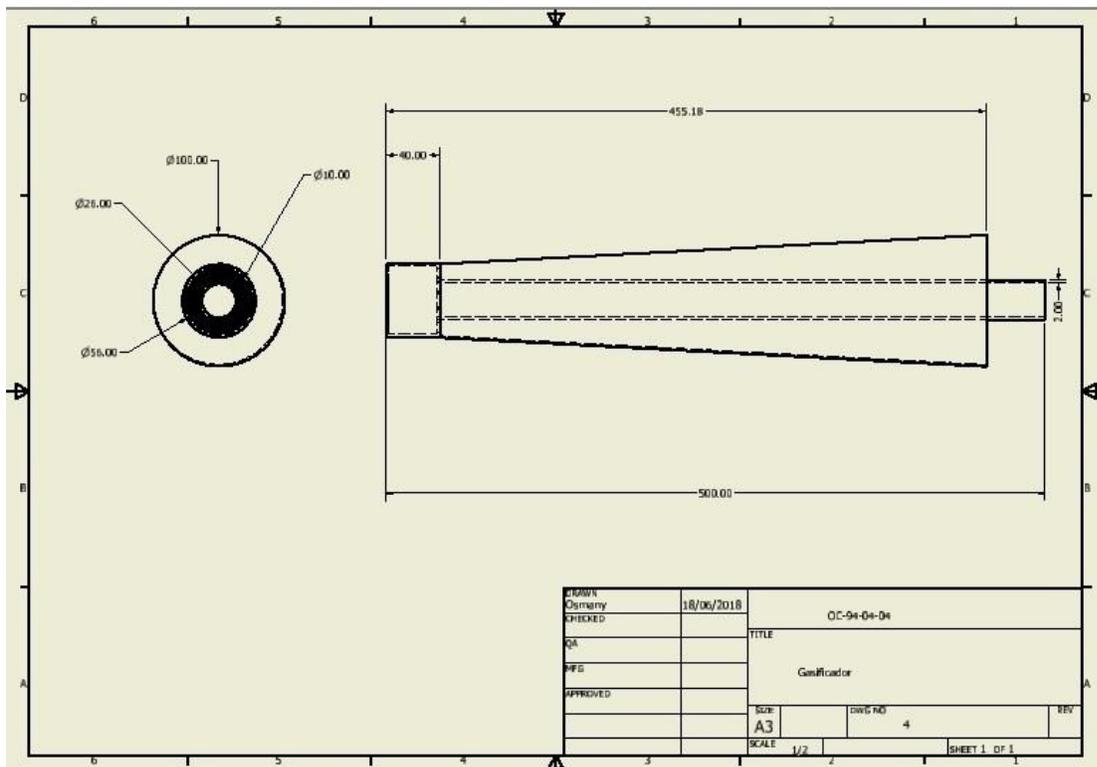


Figura 7. Plano del cuerpo del intercambiador.

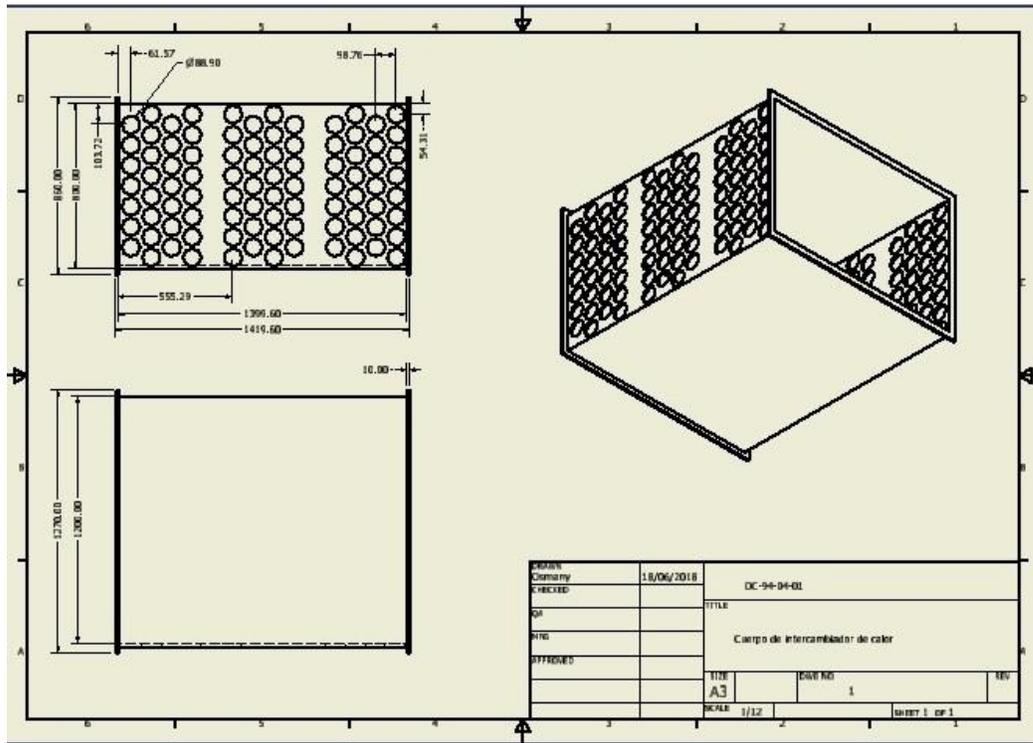


Figura 8. Plano de la entrada del intercambiador.

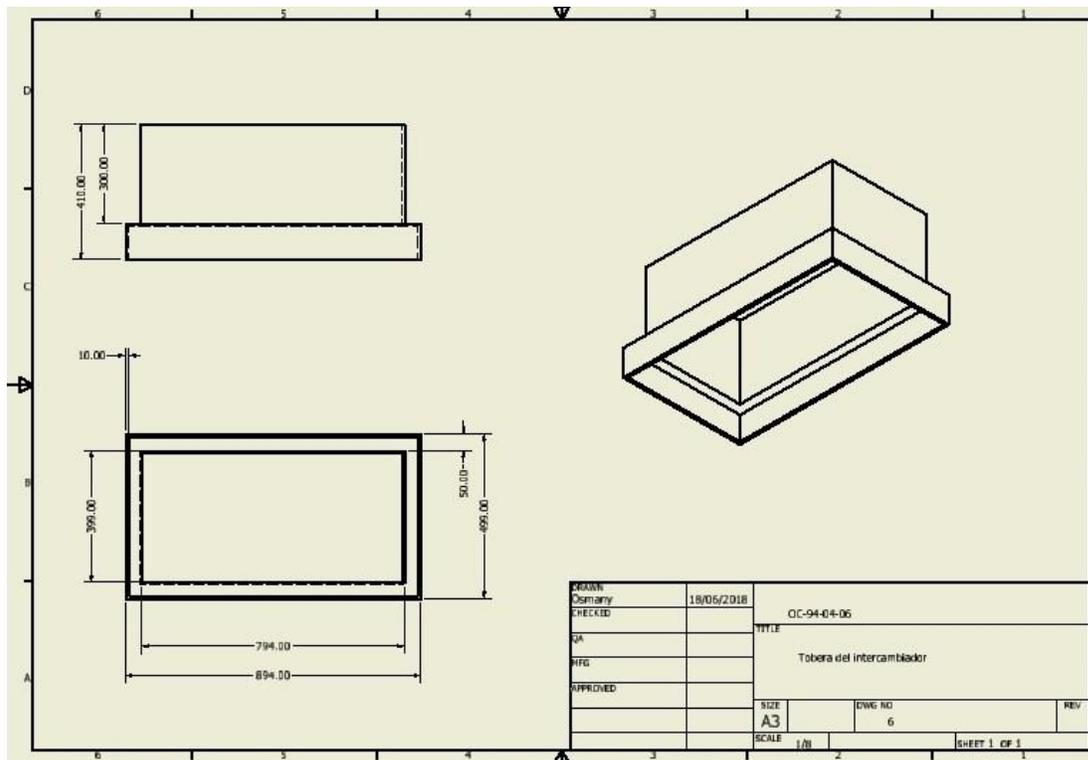


Figura 9. Plano de la tapa del Intercambiador.

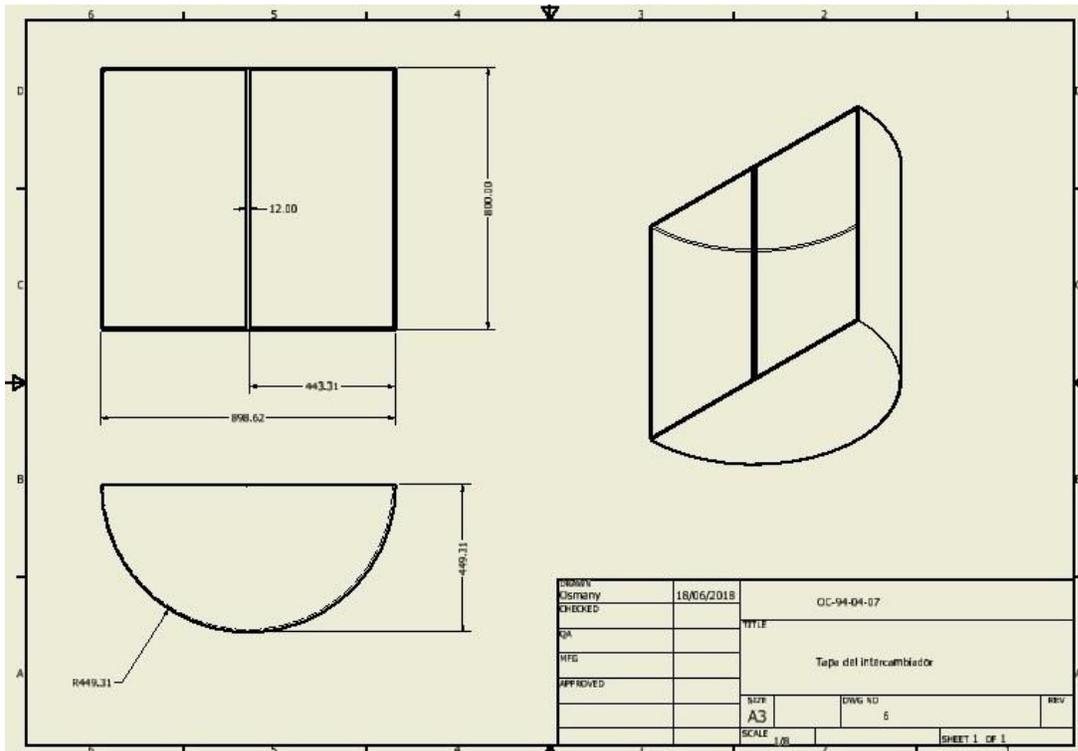


Figura 10. Plano de la base de la chimenea.

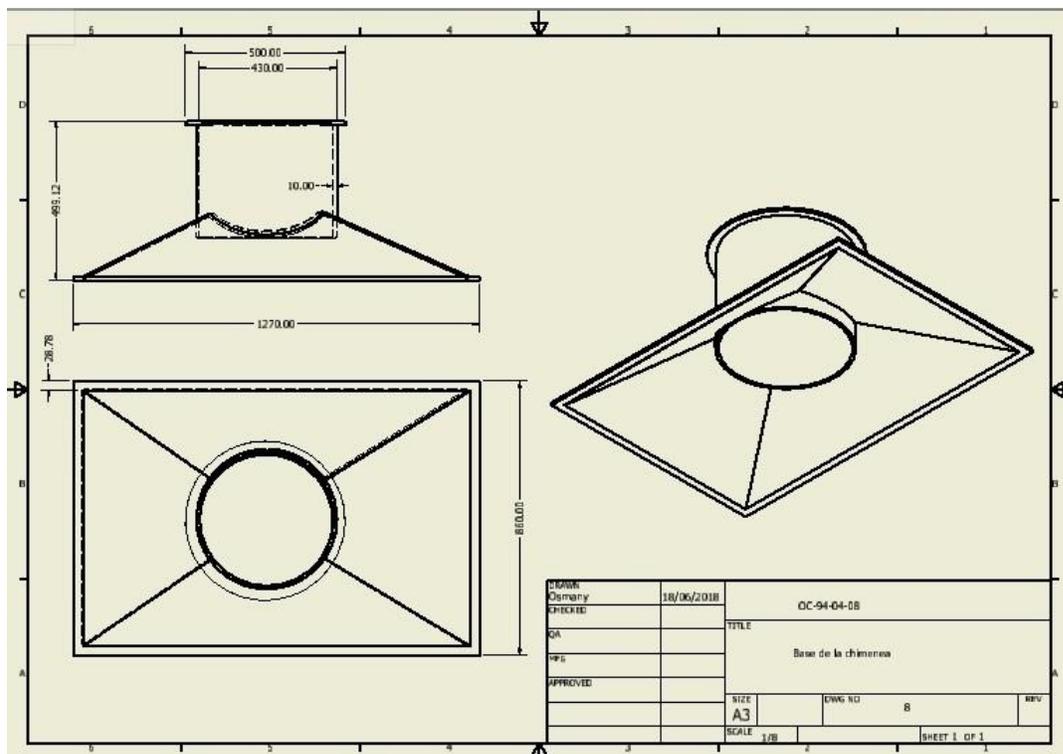


Figura 11. Plano de la chimenea.

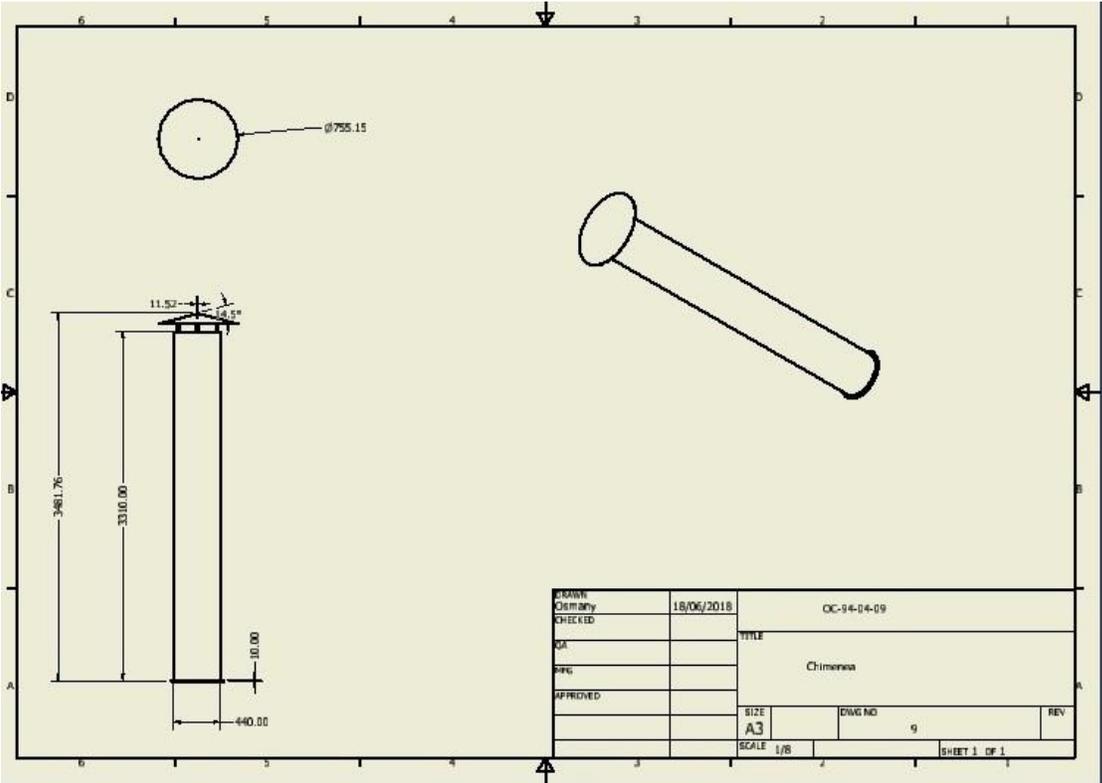


Figura 12. Gasificador

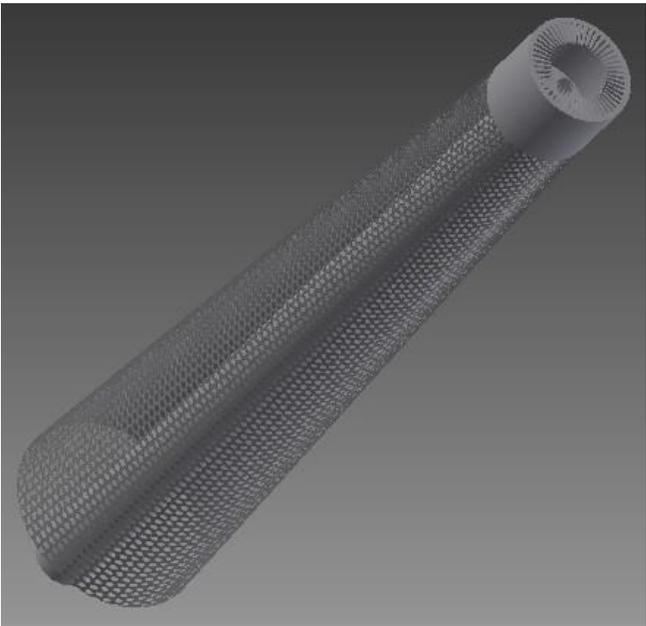


Figura 13. Prototipo del Horno de Combustión.

