

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

**Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la
Producción**

"Diseño, análisis y construcción de una estufa de uso doméstico utilizando
como fuente de combustible biomasa sólida"

TRABAJO FINAL DE GRADUACIÓN

Materia Integradora

Previo la obtención del Título de:

INGENIERO MECÁNICO

Presentado por:

Luis Montoya Mendoza

Daniel Serrano Aguirre

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2016

AGRADECIMIENTOS

Agradezco sinceramente la PhD. Emérita Delgado por su paciencia y predisposición para ayudar, así mismo, agradezco a todas las personas involucradas en el desarrollo de este proyecto.

- L. Montoya

A todas las personas involucradas en este proyecto les quedo sinceramente agradecido.

-D. Serrano

DECLARACIÓN EXPRESA

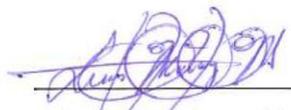
"La responsabilidad del contenido desarrollado en la presente propuesta de la materia integradora corresponde exclusivamente al equipo conformado por:

Luis Armando Montoya Mendoza

Daniel Serrano Aguirre

Ph.D. Emerita Delgado Plazo

y el patrimonio intelectual del mismo a la Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción (FIMCP) de la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL".



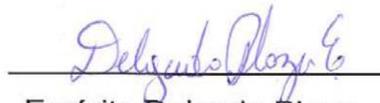
Luis Montoya Mendoza

Estudiante



Daniel Serrano Aguirre

Estudiante



Emérita Delgado Plaza

Directora

RESUMEN

En las zonas rurales de la provincia del Ecuador a partir de la información indicada por el INEC en el anuario estadístico del 2013, donde muestra que en el año 2010 más del 10% las fuentes de combustible para cocción de alimentos pertenecen a la leña. Existen sectores donde las personas no utilizan gas (GLP) para cocción de los alimentos, sino madera obtenida a través de la tala de árboles o uso de carbón vegetal debido a la complejidad del sector o por falta de recurso económico. Por lo tanto, las estufas utilizadas con carbón producen una combustión de manera descontrolada generando emisiones nocivas para los usuarios, a partir de la premisa anterior este proyecto presenta el diseño una estufa que usa biomasa como combustible principal, generando baja emisión de gases debido a que la combustión se realiza de manera controlada.

El diseño de la estufa se realiza en base a los criterios de diseño de estufa gasificadora de arroz propuesta por el Ph.D. Alexis Belonio [2], por otra parte, para la construcción del prototipo se utilizó acero ASTM-A36 debido a su fácil acceso, durabilidad y costo. A fin de realizar el análisis térmico, en las pruebas de campo se usó una termocupla para medir las diferentes temperaturas de interés en la estufa y con ellas poder determinar las pérdidas del sistema.

Para llevar a cabo las pruebas de la estufa, se utilizó cascarilla de arroz y dos tipos de biomasa compuesta, cuyas composiciones fueron: 80% hojarasca con 20% de cascarilla de arroz y 90% de ramas secas con 10% de hojarasca

A pesar de que el diseño fue basado en una estufa para cascarilla de arroz, en las pruebas de campo fue evidente la necesidad de una fuente de aire forzado al momento de usar cascarilla de arroz como combustible ya que, al no existir la cantidad de aire necesaria para la combustión completa, las emisiones de gases fueron excesivas, sin embargo, para el resto de biomasa utilizadas en las pruebas se determinó que no era necesario una corriente de aire forzado para su correcta combustión.

Conforme a los resultados de las pruebas de campo, el uso de una estufa en la que se genere una combustión controlada es viable basada en el diseño de una estufa gasificadora de cascarilla de arroz, es viable para el uso de diferentes tipos de biomasa compuestas sin la emisión de gases nocivos.

Palabras Clave: Biomasa, gasificación, combustión, emisiones, diseño.

ABSTRACT

On the rural zones of Ecuador, according to the information indicated by the INEC on the 2013 statistic yearbook, shows that in the year 2010 more than the 10% of the sources of fuel used for cooking, belong to the wood. There are sectors where people do not use gas (LPG) to prepare their food, commonly, they use wood from tree felling or charcoal, this is due to sector complexity or due to the lack of economic resources, for this reason, the stoves that uses charcoal as fuel produce an uncontrolled combustion generation toxic emissions for the users, for this reason this project presents the design of a stove that uses biomass as main source of fuel, generating low emissions due the control combustion.

The stove design was based on the design criteria of the rice husk stove proposed by Ph.D. Alexis Belonio and its construction was made of steel ASTM-A36 due to its easy access, durability and cost. In order to make a thermal analysis in the stove tests was used a thermocouple to measure the different temperatures of interest and with this data determine the losses in the system

In order to test the stove, it was used rice husk and two types of compound biomass, the composition of those biomasses were 80% dry leaves with 20% of rice husk and 90% of dry tree branches with 10% dry leaves

Although the design was based on a rice husk gasifier, on the stove tests it was noticeable the need of a source of forced air flow when using rice husk as fuel due to the fact that the amount of air needed for complete combustion generated by natural draft wasn't enough for complete combustion, thus, the emissions were excessive, Nevertheless, for the rest of biomasses used on the tests it was noticeable that forced air flow was not necessary for a proper combustion.

According to the results of the tests, the use of the stove, in which its generated controlled combustion, which design was according to the rice husk gasifier design criteria, it is possible to combust different types of compound biomass without harmful gases generation.

Keywords: Biomass, gasification, combustion, emissions, design.

ÍNDICE GENERAL

| | |
|--|------|
| RESUMEN..... | I |
| ABSTRACT | II |
| ÍNDICE GENERAL | III |
| ABREVIATURAS..... | V |
| SIMBOLOGÍA..... | VI |
| ÍNDICE DE FIGURAS | VII |
| ÍNDICE DE TABLAS..... | VIII |
| ÍNDICE DE PLANOS..... | IX |
| CAPÍTULO 1..... | 1 |
| 1. Introducción..... | 1 |
| 1.1 Descripción del problema | 1 |
| 1.2 Objetivos | 1 |
| 1.1.1 Objetivo General..... | 1 |
| 1.1.2 Objetivos Específicos..... | 1 |
| 1.3 Marco teórico..... | 2 |
| 1.3.1 Biomasa sólida. | 2 |
| 1.3.2. Recursos de biomasa sólida en la provincia Guayas. | 4 |
| 1.3.3. Caracterización de la Biomasa como combustible. | 6 |
| 1.3.4. Proceso de Combustión de la Biomasa..... | 7 |
| 1.3.5. Clasificación de estufas..... | 8 |
| 1.3.6. Aspectos medioambientales del uso de biomasa como combustible | 9 |
| CAPÍTULO 2..... | 10 |
| 2. Metodología de diseño | 10 |
| 2.1 Alternativas de diseño | 11 |
| 2.1.3 Matriz de ponderación | 13 |
| 2.2 Diseño del prototipo..... | 16 |

| | | |
|-------------------|---|----|
| 2.2.1 | Selección de materiales | 16 |
| 2.2.2 | Dimensionamiento de la estufa | 16 |
| 2.2.3 | Análisis térmico | 24 |
| 2.3 | Construcción del prototipo de la estufa | 36 |
| CAPÍTULO 3..... | | 39 |
| 3. | Pruebas de campo del prototipo de la estufa | 39 |
| 3.1 | Resultados | 41 |
| 3.2 | Seguridad del uso de la estufa | 44 |
| 3.3 | Portabilidad de la estufa | 44 |
| 3.4 | Análisis de costos..... | 45 |
| CAPÍTULO 4..... | | 46 |
| 4. | Conclusiones y Discusión..... | 46 |
| 4.1 | Conclusiones..... | 46 |
| 4.2 | Recomendaciones..... | 48 |
| BIBLIOGRAFÍA..... | | 49 |
| APÉNDICES..... | | 51 |

ABREVIATURAS

| | |
|-------|--|
| ESPOL | Escuela Superior Politécnica del Litoral |
| ASTM | American Society for Testing Materials |
| TLUD | Top Lit Updraft Gasifier |
| FCR | Razón de consumo de combustible |
| SA | Aire estequiométrico de la cascarilla de arroz |
| SGR | Razón específica de gasificación de la cascarilla de arroz |
| MC | Masa de la comida |
| Rad | Radiación |
| Conv | Convección |

SIMBOLOGÍA

| | |
|---------------|--|
| cm | Centímetro |
| m | Metro |
| cal | Calorías |
| K | Kilo |
| W | Watts |
| J | Jules |
| °K | Grados Kelvin |
| °C | Grados Centígrados |
| C | Carbono |
| H | Hidrógeno |
| N | Nitrógeno |
| O | Oxígeno |
| Un | Número de Nusselt |
| Re | Número de Reynolds |
| Pr | Número de Prandlt |
| h | Coeficiente de convección |
| σ | Constante de radiación de Stefan Boltzmann |
| ε | Emisividad del material (Acero) |
| K | Conductividad térmica |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1.1. Principales fuentes de biomasa..... | 2 |
| Figura 1.2. Clasificación de cultivos fuentes de biomasa dados en el Ecuador..... | 5 |
| Figura 2.1. Partes y principio de funcionamiento de estufa rocket | 12 |
| Figura 2.2. Estufa gasificadora | 12 |
| Figura 2.3. Análisis de transferencia de calor..... | 24 |
| Figura 2.4. Circuito de radiación en las paredes de la cámara de combustión | 33 |
| Figura 2.5. Diagrama de flujo del proceso de construcción | 37 |
| Figura 2.6. Prototipo de estufa doméstica | 38 |
| Figura 2.7. Reactor del prototipo | 38 |
| Figura 3.1. Puntos de medición de temperaturas | 40 |
| Figura 3.2 Prueba N°1 con cascarilla de arroz | 41 |
| Figura 3.3. Prueba N°2 Con hojarasca y cascarilla de arroz | 42 |
| Figura 3.4. Prueba N°3 con ramas secas y hojarasca | 43 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1. Tipos de residuos sólidos. | 4 |
| Tabla 2. Principales productos agrícolas cultivados en la provincia del Guayas y la generación de residuos anual. | 5 |
| Tabla 3. Clasificación de estufas | 8 |
| Tabla 4. Ventajas y desventajas de las diferentes estufas | 9 |
| Tabla 5. Fases de diseño según criterio de Bruce Archer. | 10 |
| Tabla 6. Importancia relativa | 13 |
| Tabla 7. Factor de importancia relativa entre criterios | 14 |
| Tabla 8. Factor de importancia relativa entre costo y opciones de estufa | 14 |
| Tabla 9. Factor de importancia relativa entre durabilidad y opciones de estufa | 14 |
| Tabla 10. Factor de importancia relativa entre portabilidad y opciones de estufa | 14 |
| Tabla 11. Factor de importancia relativa entre seguridad y opciones de estufa | 15 |
| Tabla 12. Factores importancia relativa de cada criterio comparado con cada estufa . | 15 |
| Tabla 13. Resultados de la suma ponderada de los parámetros..... | 15 |
| Tabla 14. Materiales de las diferentes partes de la estufa | 16 |
| Tabla 15. Composición química de la cascarilla de arroz y su peso porcentual..... | 17 |
| Tabla 16. Cantidad de moles totales de la ecuación de combustión balanceada estequiométricamente para la cascarilla de arroz | 18 |
| Tabla 17. Energía para cocinar alimentos para agua en ebullición | 20 |
| Tabla 18. Tabla de componentes y materiales usados en la construcción del prototipo | 37 |
| Tabla 19. Medición de temperaturas obtenidas de prueba del prototipo de la estufa con 100% cascarilla de arroz como combustible..... | 41 |
| Tabla 20. Temperaturas de prueba del prototipo de la estufa con mezcla de 20% de cascarilla de arroz y 80% de hojarasca como biomasa..... | 42 |
| Tabla 21. Temperaturas de prueba del prototipo de la estufa con mezcla de 90% de ramas secas y 10% de hojarasca como biomasa. | 43 |
| Tabla 22. Análisis de costo de la estufa | 45 |

ÍNDICE DE PLANOS

- PLANO 1 Estufa gasificadora
- PLANO 2 Detalle de Soldadura

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Descripción del problema

Actualmente, en las zonas rurales de la provincia del Guayas, existen sectores que no usan combustibles de origen fósil para la preparación de sus alimentos como es el caso del GLP, debido a que no cuentan con vía de acceso o recurso económico. Por esta razón los habitantes de estos sectores usan como alternativa la estufa de leña la cual genera gran cantidad de gases nocivos para la salud de los usuarios.

De lo antes mencionado, el proyecto plantea la construcción de una estufa que utilice principalmente biomasa sólida procedente de residuos de procesos agrícolas, corte de poda, etcétera.

Por otra parte, una buena combustión de la biomasa sería una alternativa viable para reducir las emisiones de dióxido de carbono, logrando completar el llamado "ciclo de carbono". Estas emisiones y otros gases nocivos se verán reducidos al reemplazar las estufas de leña y al mejorar el diseño de estas.

1.2 Objetivos

1.1.1 Objetivo General

- Diseñar y construir una estufa semi-portátil, que funcione con biomasa sólida para ser aplicable a sectores rurales.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Analizar la mejor alternativa de diseño del prototipo experimental a través de una matriz de decisión
- Realizar el diseño de la estufa a través del análisis térmico de transferencia calor.

- Analizar cuantitativamente el tipo de biomasa de las zonas que generan residuos de agricultura para usarla como combustible en la estufa.
- Desarrollar pruebas de operación del prototipo experimental con las diferentes composiciones de biomasa.

1.3 Marco teórico.

El uso de biomasa sólida como combustible es ampliamente aplicado en zonas rurales del Ecuador, sin embargo, la disponibilidad de los diferentes tipos de biomasa varía según las zonas, las condiciones bajo las cuales es usada como combustible y la forma de combustionar la biomasa.

1.3.1 Biomasa sólida.

La biomasa sólida se considera como: las sustancias orgánicas que tienen su origen en los compuestos de carbono formados en la fotosíntesis [Atlas bioenergético del Ecuador 2014]. Estas sustancias pueden haber sufrido, previamente diferentes procesos, naturales o artificiales, de escasa o elevada complejidad.

En la figura 1.1. se ilustra las principales fuentes de biomasa.

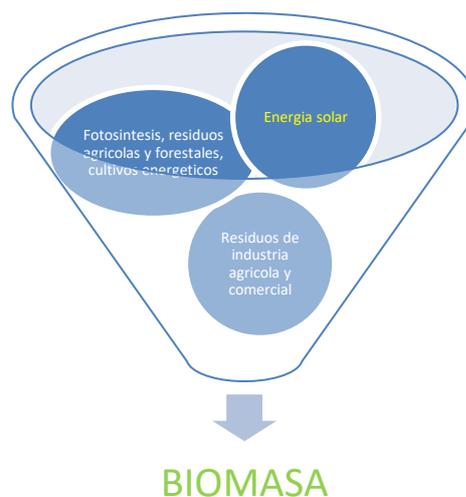


Figura 1.1. Principales fuentes de biomasa

Fuente: Elaboración propia

La importancia de la biomasa para el ecosistema radica en que forma parte para mantener el equilibrio ecológico y permitir la conservación y diversidad biológica.

Los distintos tipos de biomasa están caracterizados por la cantidad de energía que contienen y que pueden llegar a liberar cuando se someten a un proceso de conversión. Siendo los componentes predominantes de la biomasa el carbono, oxígeno e hidrogeno.

Por otra parte, las fuentes de biomasa solida se pueden dividir en fuentes de carácter primario y secundario; siendo las primeras de cultivos energéticos y la biomasa forestal extraída con fines energéticos, es decir su gestión y utilización va orientada a la producción de energía. En las fuentes de origen secundario, es la denominada fuente de biomasa residual seca, se incluyen los subproductos agrícolas (caña, paja), forestales (restos de las intervenciones silvícolas, como ramas y árboles sin valor comercial) e industriales (bagazo, cascarilla de arroz, cascara de almendras, hueso de oliva etcétera). Tanto la biomasa primaria como secundaria, pueden ser aprovechadas directamente mediante procesos termoquímicos, como es el caso de la combustión.

En la tabla 1 se muestra el origen y tipo de residuos que se pueden utilizar como biomasa sólida residual.

Tabla 1. Tipos de residuos sólidos.

| Categoría | Actividad origen del recurso | Tipos | Residuos que genera |
|--|--|---|--|
| Residuos forestales | Tratamientos silvícolas: corta de mejora y cortas parciales Clareos, podas | Principalmente en montes repoblados o en aquellos naturales con un cierto interés económico | Arboles de pequeño tamaño (pies menores) sin valor comercial ramas de poda |
| | Tratamientos silvícolas: corta de generación | Objeto de extracción de madera del monte tanto en masas naturales como en artificiales. | Copas, ramas, pies secos sin interés |
| | Incendios forestales | En piñares por lo general | Arboles de escaso interés comercial |
| Residuos agrícolas | Cultivo de especies herbáceas. | Cereales, oleaginosas, algodón, etc. | Pajas, zuros, bagazos, etc. |
| | Poda de especies leñosas | Olivo, frutales, viñedos | Ramas, pies secos |
| Industrias agroalimentarias | Industrias extractivas Industrias preparadoras | Extractivas de café, aceite, vinícolas, algodón Preparación de arroz frutos secos | Crujo de oliva, alpechines cascarilla de arroz, desmotado de algodón |
| | Industrias forestales | Primera transformación | Aserrado Fabricación de tableros Desarrollo y chapas Celulosas Industrias del corcho |
| Segunda y posteriores transformaciones | | Carpintería, muebles Embalajes de madera, pales Papel, derivados del corcho | Recortes, tacos, serrín, virutas, polvo de lijado Papel, recorte de corchos |

Fuente: Fernando Nogues, Daniel García y Adelina Rezeau. ENERGIA de la biomasa [2010]

1.3.2. Recursos de biomasa sólida en la provincia Guayas.

Atlas Bioenergético del Ecuador (2014) En la provincia del Guayas el recurso de biomasa es altamente extenso, esto significa que existen diversas fuentes de aprovechamiento de biomasa solida por ser una provincia de alto índice de actividad agrícola.

Existen numerosos campos de producción agrícola, los que podemos denominar como cultivos permanentes y cultivos transitorios, en la figura 1.2. se muestra la clasificación de los diferentes tipos de cultivos que se pueden aprovechar sus residuos como fuentes de biomasa.

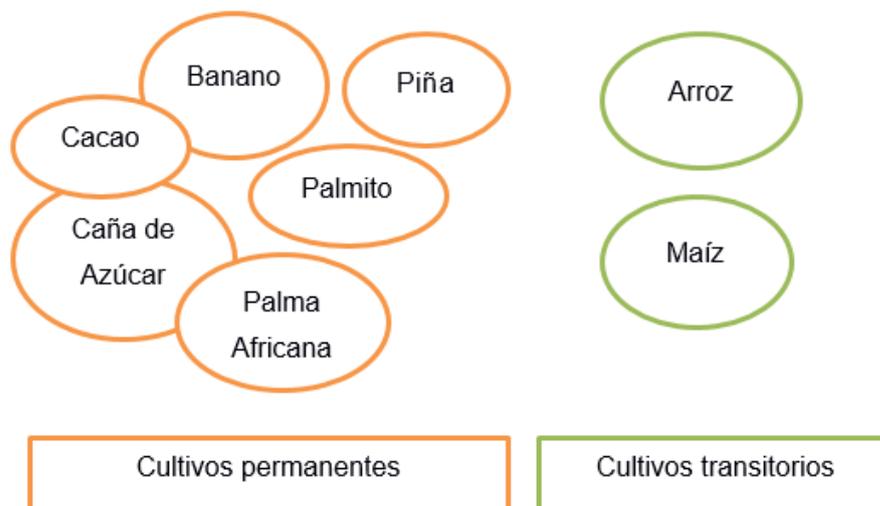


Figura 1.2. Clasificación de cultivos fuentes de biomasa dados en el Ecuador

Fuente: Elaboración propia

A partir del atlas Bioenergético del Ecuador publicado en el año 2014, se estima que la mayor producción agrícola y sus residuos en la provincia de las guayas se obtienen de la producción del arroz, banano, caña de azúcar, cacao y palma africana.

En la tabla 2 se muestra la cantidad de producción agrícola y generación de residuos estimadas al año, observándose que la principal fuente de residuo agrícola es la cascarilla de arroz.

Tabla 2. Principales productos agrícolas cultivados en la provincia del Guayas y la generación de residuos anual.

| Provincia | Superficie [km ²] | Producto | Producción absoluta [t/año] o [cabezas/año] | Residuos [t/año] |
|-----------|-------------------------------|----------------|---|-------------------|
| Guayas | 153341,98 | Arroz | 976018,96 | 1311525,48 |
| | | Banano | 1665723,71 | 1099377,65 |
| | | Caña de azúcar | 3708226,02 | 593316,16 |
| | | Cacao | 57992,64 | 718018,43 |
| | | Palma africana | 65913,82 | 168890,97 |
| | | TOTAL | 6473875,15 | 3891128,69 |

Fuente: Eisin, *Atlas bioenergético del Ecuador* [2014]

1.3.3. Caracterización de la Biomasa como combustible.

En las secciones 1.3.3. y 1.3.4. se hace un resumen de lo indicado en el libro “Energía de la Biomasa” [Fernando Nogue, Daniel García y Adelina Rezeau. ENERGIA de la biomasa, 2010]. Los diferentes tipos de biomasa se originan cada uno de una manera particular, por lo que sus propiedades varían dependiendo de su procedencia

a) Propiedades Físicas

Entre las propiedades físicas de interés tenemos la densidad y la humedad. Y su distribución granulométrica. Estas propiedades varían con el estado en el que se encuentre la biomasa, es decir, la densidad y la humedad serán diferentes si comparamos un residuo agrícola recientemente generado, con uno que haya sido previamente tratado ya que su grado de compactación y humedad serán diferentes. Por otro lado, la granulometría se refiere al estado en el que se encuentre la biomasa: troncos, ramas, astillas, polvo, etc.

b) Propiedades Químicas

Las propiedades químicas de interés se refieren a las composiciones químicas de las diferentes biomásas, así como su contenido de cenizas.

Para caracterizar las propiedades químicas de la biomasa se realizan los análisis de tipo elemental e inmediato.

- **Análisis elemental.** - Determina los porcentajes en peso de los principales elementos constitutivos de la materia orgánica, es decir, el peso porcentual del carbono, hidrógeno, nitrógeno, oxígeno y azufre. Esta información se utiliza para determinar la cantidad de aire que se necesita en la combustión (combustión ideal).
- **Análisis inmediato.** - El análisis determina la humedad, contenido de cenizas, materia volátil y carbono fijo de la biomasa. El contenido de humedad nos indica la cantidad de agua que contiene

la biomasa. La materia volátil, que se presenta como gases y vapores, se oxidan en presencia de oxígeno a alta temperatura. Una vez combustionada la materia volátil, el carbono fijo queda presente en forma de cenizas.

c) Propiedad Energética

La propiedad energética se conoce como poder calorífico y representa la energía química que posee el combustible para poder ser transformada en energía térmica a través de la combustión.

Para determinar el poder calorífico de un combustible, se usa un calorímetro en el que se combustiona una determinada cantidad de masa del combustible, si tras la combustión se genera en las paredes del calorímetro condensación de vapor de agua, entonces se obtiene el P.C.S., si el agua permanece en forma de vapor, entonces se obtiene el P.C.I.

1.3.4. Proceso de Combustión de la Biomasa

La combustión al ser un proceso termoquímico, se tendrá al oxígeno presente en el aire como comburente y a la biomasa sólida como combustible. Durante el proceso se generan gases de combustión y cenizas. Los componentes de la biomasa (C, O, N, H, S) se oxidan en la combustión estequiométrica. Sin embargo, en el proceso real de combustión, a fin de que se produzcan inquemados, se trabaja con exceso de aire, sin que este sea sobre utilizado, puesto que se estaría calentando el exceso de aire y como consecuencia disminuiría la utilización del calor liberado por la biomasa. Para obtener una buena combustión se recomienda trabajar con la regla de las tres T que implica, un ajuste entre la temperatura, el tiempo de residencia y la turbulencia.

1.3.5. Clasificación de estufas

Tomando como consideración la denominada clasificación de Anderson para estufas. TLUD Stoves in 2011, recuperado de internet (2016), existen diversos tipos de diseños como se indican a continuación:

1. Estufas de leña
2. Estufas mejoradas (fabricadas con arcilla/cerámica/canastillas)
3. Estufas cohete (Funcionan con aire forzado)
4. Estufas semi-gasificadoras (Cierta nivel de control de aire)
5. Estufas gasificadoras (Funcionan bajo el principio TLUD)
6. Estufas con "fan jet" (Corriente de aire fuerte)
7. Estufas sin biomasa (Usan: derivados del petróleo, bio-gas, eléctricas)

Tabla 3. Clasificación de estufas

| | | |
|--|--|--|
|  |  |  |
| <p style="text-align: center;">Estufa De Leña Funte: Elaboración propia</p> | <p style="text-align: center;">Estufa Mejorada Funte: http://www.snv.org/sector/energy/topic/improved-cookstoves</p> | <p style="text-align: center;">Estufa Rocket Funte: https://www.youtube.com/watch?v=rKDuLqLhkzk</p> |
|  |  |  |
| <p style="text-align: center;">Estufa Semigasificadora Funte: https://ds.lclark.edu/sge/2013/03/20/two-modern-technologies-for-enhanced-biomass-energy/</p> | <p style="text-align: center;">Estufa Semigasificadora Funte: http://evokit-notes.tumblr.com/post/25623212352/rice-husk-gasifier-stove</p> | <p style="text-align: center;">Estufa Semigasificadora Funte: http://www.envirotorns.com/images/Gasifier.gif</p> |

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 4 se presentan las ventajas y desventajas más relevantes de cada una de las estufas consideradas en la clasificación mencionada

Tabla 4. Ventajas y desventajas de las diferentes estufas

| Tipo de estufa | Ventaja | Desventaja |
|--------------------------|---------------------|--|
| Estufa de leña | Fácil fabricación | Gran cantidad de emisiones |
| Estufa mejorada | Portabilidad | Genera considerable cantidad de emisiones |
| Estufa cohete | Portabilidad | No aprovecha al máximo los gases volátiles de la biomasa |
| Estufa semi-gasificadora | Mejor combustión | No aprovecha al máximo los gases volátiles de la biomasa |
| Estufa gasificadora | Mejor combustión | Más costosa que las anteriores |
| Estufa con Fan Jet | Mejor combustión | Utiliza energía eléctrica |
| Estufas sin biomasa | Se fabrican en masa | Costo elevado |

Fuente: Elaboración propia

1.3.6. Aspectos medioambientales del uso de biomasa como combustible

La combustión de biomasa es un proceso que se considera neutro en emisiones de CO₂, debido a que el CO₂ que se libera hacia la atmósfera durante la combustión será el mismo que se ha fijado en la biomasa a través de la fotosíntesis durante el crecimiento de los cultivos sin considerar procesos previos generados a partir de las actividades humanas. Por dicha razón es importante mantener bajos los niveles de emisiones debidos a una combustión incompleta.

CAPÍTULO 2

2. Metodología de diseño

Existen diferentes parámetros que se pueden considerar a la hora de plantear el diseño de la estufa, para ello se implementará el criterio de Bruce Archer que consiste en aplicar tres fases en el proceso de diseño siendo las siguientes:

- **Fase Analítica:** Comprende desde la recopilación, ordenamiento de datos, evaluación, definición de condicionantes, estructuración y jerarquización.
- **Fase creativa:** Corresponde a la formulación de la idea rectora, toma de partido, formalización de la idea y verificación.
- **Fase ejecutiva:** En esta etapa se realiza la valoración crítica, ajuste de la idea desarrollo y materialización

Estos parámetros se aplicaron para el diseño y construcción del prototipo experimental de la estufa, en tabla 5 se ilustra las diferentes fases antes mencionadas.

Tabla 5. Fases de diseño según criterio de Bruce Archer.

| Criterio de Bruce Archer para el diseño de la estufa | |
|--|---|
| Fase analítica | Recopilación de información sobre tipos de estufas Recopilación de información sobre biomasa sólida Información sobre generación de biomasa sólida en la provincia del Guayas Especificaciones de diseño Selección de posibles diseños y uso de matriz de decisión para seleccionar el modelo que mejor se acople a las condiciones requeridas. Selección de materiales para la construcción de acuerdo a factores económicos y durabilidad. |
| Fase creativa | Diseño de forma Selección de criterios de diseño Diseño detallado de acuerdo a las ecuaciones y condiciones iniciales |
| Fase ejecutiva | Reajustes en el diseño de acuerdo a valoraciones conforme a los potenciales usuarios Construcción de la estufa de acuerdo los reajustes del diseño detallado, y los materiales seleccionados. Puesta a prueba con distintos tipos de biomasa Toma de datos para análisis térmico y discusión resultados. |

Fuente: Elaboración propia

2.1 Alternativas de diseño

Existen diferentes alternativas de estufas que usan biomasa sólida como combustible y para poder lograr satisfacer la necesidad de los potenciales usuarios se ha optado por dos alternativas, las cuales tienen características que son deseables para el diseño final de la estufa.

Para la elaboración de la matriz de decisión se consideró en primera instancia el siguiente grupo de estufas explicado previamente en la sección 1.3.5.

Debido a que la construcción del prototipo de realizarse en metal, debe de ser de bajo costo y funcionar en cualquier medio, se ha seleccionado las estufa tipo cohete y la estufa gasificadora para ser analizados en la matriz de decisión ya que ambos contemplan características y funcionamiento similar.

- Estufa tipo cohete
- Estufa gasificadora

A continuación, se detalla brevemente cada uno de los posibles diseños.

Estufa tipo cohete

También conocida como estufa rocket, es un modelo de estufa que tiene por objetivo aprovechar la leña de forma eficiente, asegurando una combustión completa y maximizando el uso del calor. Además de reducir la cantidad de leña en relación a un calentador convencional, también permite reducir la emisión de gases nocivos.

Las estufas "rocket" incorpora una cámara de combustión simple a alta temperatura que contiene una chimenea vertical aislada, que asegura el 100% de la combustión antes que las llamas alcancen la superficie de cocción. En 1982, el Dr. Larry Winiarski describe los principios usados en esta tecnología.

Por otra parte, el diseño de la estufa tiene un impacto directo en el cuidado de los bosques por que utiliza poca leña y permite reducir las emisiones casi a cero. Evans & Jackson, Rocket mass heter (2006).

Los componentes principales de una estufa cohete son:

- Tambor de carga: donde se coloca la biomasa sólida siendo la fuente de alimentación de la cámara de combustión.
- Cámara de combustión.

- Chimenea vertical: provee la corriente ascendente de aire necesaria para mantener la combustión.

En la siguiente figura 2.1 se muestra la estufa cohete o rocket con cada una de sus partes

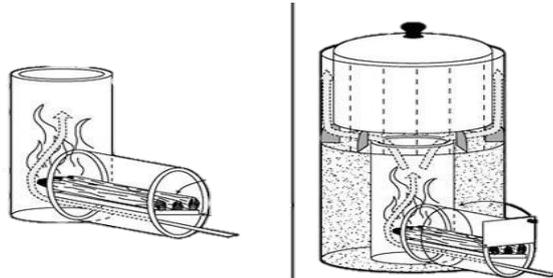


Figura 2.1. Partes y principio de funcionamiento de estufa rocket

Fuente: Winiarski, 1982

Estufa Gasificadora

Este tipo de estufas usan dos corrientes de aire, el aire primario y el aire secundario, los cuales viajan a través de dos cilindros concéntricos. En estas estufas se llena el reactor (cilindro interno) y se enciende la biomasa en la parte superior y durante los primeros minutos de operación, la combustión de la biomasa genera únicamente pirolisis y a medida que la biomasa debajo de la llama se calienta, esta libera gases volátiles combustibles que se mezclan con el aire secundario que ha sido previamente calentado en la parte exterior del reactor, es decir, entre los cilindros concéntricos. Esta combustión de gases en la parte superior se produce debido a que el aire secundario proporciona la cantidad de oxígeno necesaria para la combustión.



Figura 2.2. Estufa gasificadora

Fuente: Clentove.org/technology

2.1.3 Matriz de ponderación

Una vez indicado los tipos de estufas a analizar, será necesario indicar los criterios para la selección adecuada de la estufa.

Criterios prioritarios que se tomarán en consideración para el análisis:

- Costo
- Durabilidad
- Portabilidad
- Seguridad

Los criterios mencionados serán ponderados para determinar la mejor opción

La tabla 6 muestra la importancia relativa, estos valores serán utilizados para establecer la importancia de un criterio comparándolo con los demás

Tabla 6. Importancia relativa

| Respuestas | Valor |
|-------------------------------------|-------|
| Igualmente, importante | 1 |
| Significativamente importante | 5 |
| Excesivamente más importante | 10 |
| Significativamente menos importante | 1/5 |
| Excesivamente menos importante | 1/10 |

Fuente: Elaboración propia

La tabla 7 muestra el valor de importancia relativa de cada criterio comparado con los demás. En esta tabla se puede observar la suma de cada fila y el total, donde, la división de ambas cantidades nos da como resultado un factor P denominado factor de ponderación, este factor de importancia relativa, el cual nos determina la importancia de cada criterio.

Tabla 7. Factor de importancia relativa entre criterios

| Criterio | Costo | Durabilidad | Portabilidad | Seguridad | Suma | P |
|---------------------|--------------|--------------------|---------------------|------------------|-------------|----------|
| Costo | | 5,00 | 5,00 | 10,00 | 20,00 | 0,80 |
| Durabilidad | 0,20 | | 1,00 | 1,00 | 2,20 | 0,09 |
| Portabilidad | 0,20 | 1,00 | | 0,20 | 1,40 | 0,06 |
| Seguridad | 0,10 | 1,00 | 0,20 | | 1,30 | 0,05 |
| Total | | | | | 24,90 | 1,00 |

Fuente: Elaboración propia

Las tablas 8, 9 ,10 y 11 muestran la importancia relativa de cada criterio comparado con cada una de las opciones de la estufa, esto se realiza a fin de obtener el Factor de importancia relativa entre criterios y opciones.

Tabla 8. Factor de importancia relativa entre costo y opciones de estufa

| Costo | Estufa tipo cohete | Estufa gasificadora | Suma | P |
|---------------------|---------------------------|----------------------------|-------------|----------|
| Estufa tipo cohete | | 1,00 | 1,00 | 0,50 |
| Estufa Gasificadora | 1,00 | | 1,00 | 0,50 |
| Total | | | 2,00 | 1,00 |

Fuente: Elaboración propia

Tabla 9. Factor de importancia relativa entre durabilidad y opciones de estufa

| Durabilidad | Estufa tipo cohete | Estufa gasificadora | Suma | P |
|---------------------|---------------------------|----------------------------|-------------|----------|
| Estufa tipo cohete | | 1,00 | 1,00 | 0,50 |
| Estufa gasificadora | 1,00 | | 1,00 | 0,50 |
| Total | | | 2,00 | 1,00 |

Fuente: Elaboración propia

Tabla 10. Factor de importancia relativa entre portabilidad y opciones de estufa

| Portabilidad | Estufa tipo cohete | Estufa gasificadora | Suma | P |
|---------------------|---------------------------|----------------------------|-------------|----------|
| Estufa tipo cohete | | 0,20 | 0,20 | 0,04 |
| Estufa gasificadora | 5,00 | | 5,00 | 0,96 |
| Total | | | 5,20 | 1,00 |

Fuente: Elaboración propia

Tabla 11. Factor de importancia relativa entre seguridad y opciones de estufa

| Seguridad | Estufa tipo cohete | Estufa gasificadora | Suma | P |
|---------------------|---------------------------|----------------------------|-------------|----------|
| Estufa tipo cohete | | 0,20 | 0,20 | 0,04 |
| Estufa gasificadora | 5,00 | | 5,00 | 0,96 |
| | | Total | 5,20 | 1,00 |

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 12 se muestra el resumen de las comparaciones anteriores, es decir, los factores de importancia relativa entre criterios y opciones.

Tabla 12. Factores importancia relativa de cada criterio comparado con cada estufa

| | Costo | Durabilidad | Portabilidad | Seguridad |
|----------------------------|--------------|--------------------|---------------------|------------------|
| Estufa tipo cohete | 0,50 | 0,50 | 0,04 | 0,04 |
| Estufa gasificadora | 0,50 | 0,50 | 0,96 | 0,96 |

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 13 se pueden observar los resultados de la matriz de ponderación, en la cual se ha tomado el factor de importancia relativa entre criterios y se ha multiplicado por el factor de importancia relativa de los criterios comparados con cada estufa y así la suma total nos determina por medio del número mayor la mejor opción a seleccionar entre las dos estufas.

Tabla 13. Resultados de la suma ponderada de los parámetros

| | Costo | Durabilidad | Portabilidad | Seguridad | Total |
|----------------------------|--------------|--------------------|---------------------|------------------|--------------|
| Estufa tipo cohete | 0,402 | 0,044 | 0,002 | 0,002 | 0,450 |
| Estufa gasificadora | 0,402 | 0,044 | 0,054 | 0,050 | 0,550 |

Fuente: Elaboración propia

Debido a que la estufa gasificadora obtuvo una mayor ponderación en los criterios de portabilidad y de seguridad esta se convierte en la opción con una mayor puntuación en la matriz de ponderación, por tanto, es el modelo que se va a considerar para el diseño.

2.2 Diseño del prototipo

Para diseñar el prototipo, se ha tomado como referencia la estufa gasificadora de cascarilla de arroz del Ph.D. Alexis Belonio, cuyo diseño cuenta con dos cilindros concéntricos, siendo el interno un reactor para la combustión de la cascarilla y el externo forma una cámara de aire. Para generar una combustión completa, es necesario colocar dos entradas de aire al sistema, siendo estos, la entrada de aire primario ubicado en la parte inferior de la estufa y la entrada de aire secundario ubicado en la parte superior de la estufa.

En el reactor, para que se pueda generar el proceso de pirolisis, la entrada de aire primario suministra el oxígeno necesario para combustionar la biomasa, mientras que la entrada de aire secundario suple el oxígeno necesario para combustionar los gases volátiles emitidos en el proceso de gasificación.

2.2.1 Selección de materiales

Para las diferentes partes de la estufa, se requieren diferentes materiales debido al calor que va a ser sometidas. La selección de materiales para cada componente de la estufa se detalla a continuación en la tabla 14.

Tabla 14. Materiales de las diferentes partes de la estufa

| Parte | Material | Observación |
|------------------|---------------------------|---|
| Reactor | Acero ASTM – A36 perforad | El reactor se encuentra sometido a altas temperaturas por el proceso de combustión de la cascarilla de arroz. |
| Cilindro externo | Acero ASTM – A36 | Se encuentra expuesto al medio ambiente |
| Base | Acero ASTM – A36 | Se encuentra expuesto al medio ambiente |

Fuente: elaboración propia

2.2.2 Dimensionamiento de la estufa

Debido al proceso de combustión dentro del reactor, se determinará la cantidad de aire estequiométrico necesario para la combustión. Para esto se utiliza el peso porcentual de los componentes en la cascarilla de arroz como se muestra en la tabla 15.

Tabla 15. Composición química de la cascarilla de arroz y su peso porcentual

| Composición Química de la cascarilla de Arroz | | | | |
|---|------|-----|------|-----|
| | C | H | O | N |
| %Peso | 39.1 | 5.2 | 37.2 | 0.6 |

Fuente: A. Prada, C.Cortéz, 2010.

Para el análisis de combustión se procede a determinar la ecuación del combustible ($C_nH_aO_bN_q$), donde n, a, b y q representan la cantidad de átomos de cada elemento. El valor de estos subíndices nos ayudará a determinar la fórmula de combustión estiquimétrica.

Los subíndices n, a, b y q se calculan mediante la siguiente expresión:

$$Cantidad\ de\ átomos = \frac{\% del\ elemento\ x\ Peso\ molecular\ C}{\% de\ C\ x\ Peso\ molecular\ del\ elemento} \quad (Ecuación\ 1)$$

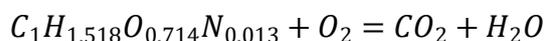
Asumiendo que n=1

$$a = \frac{\% peso\ de\ H\ x\ Peso\ molecular\ C}{\% peso\ de\ C\ x\ Peso\ molecular\ H} = \frac{(5.2)(12.01)}{(39.1)(1.01)} = 1.581$$

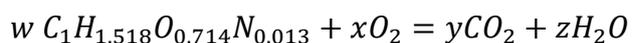
$$b = \frac{\% peso\ de\ O\ x\ Peso\ molecular\ C}{\% peso\ de\ C\ x\ Peso\ molecular\ O} = \frac{(37.2)(12.01)}{(39.1)(16)} = 0.714$$

$$q = \frac{\% peso\ de\ N\ x\ Peso\ molecular\ C}{\% peso\ de\ C\ x\ Peso\ molecular\ N} = \frac{(0.6)(12.01)}{(39.1)(14.02)} = 0.013$$

Por lo tanto, la fórmula de combustión para la cascarilla de arroz se describe a continuación



Balanceando la ecuación como se muestra a continuación:



Para determinar los coeficientes de cada molécula se toma que w = y = 1 y se procede a igualar la cantidad de átomos de cada elemento antes y después de la reacción de combustión

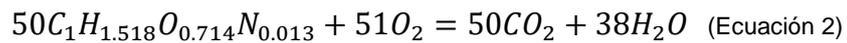
$$C \rightarrow w = y = 1$$

$$H \rightarrow 1.518w = 2z \rightarrow z = \frac{1.518w}{2} = \frac{1.518(1)}{2} = 0.759$$

$$O \rightarrow 0.714w + 2x = 2y + z \rightarrow x = \frac{2y + z - 0.714w}{2}$$

$$= \frac{2(1) + 0.759 - 0.714(1)}{2} = 1.022$$

Por lo tanto



Debido a la baja cantidad de nitrógeno en la ecuación 2, este elemento será depreciado en el análisis. La cantidad de g/mol totales para cada elemento se presentan en la tabla 16

Tabla 16. Cantidad de moles totales de la ecuación de combustión balanceada estequiométricamente para la cascarilla de arroz

| Cantidad | Elemento | g/mol | g/mol total |
|----------|----------|-------|-----------------|
| 1 | C | 12,01 | 12,01 |
| 1,518 | H | 1,01 | 1,53318 |
| 0,714 | O | 16 | 11,424 |
| TOTAL | | | 24,96718 |

Fuente: Elaboración propia

Posterior al cálculo de moles totales, se determina la masa total de combustible requerida en el balance de la combustión de la cascarilla de arroz

$$24.967 \frac{\text{gramos}}{\text{mol}} * 50 = 1248.35 \text{ gramos de cascarilla de arroz}$$

La masa total de aire necesaria sería (O2)

$$32 \frac{\text{gramos}}{\text{mol}} * 51 = 1632 \text{ gramos de oxígeno}$$

Tomando la condición estándar del porcentaje de oxígeno en el aire de 21% tenemos que

$$1632 \text{ gramos de } O_2 * \frac{100 \text{ gramos de aire}}{210 \text{ gramos de } O_2} * \frac{1Kg}{1000g} = 7.771 \text{ kg aire}$$

Para determinar la cantidad de aire primario se usa el ratio equivalente que es una relación entre el aire primario y secundario necesarios en la combustión de la cascarilla de arroz. De acuerdo a varias publicaciones científicas sobre la gasificación de la cascarilla de arroz, el valor óptimo de ratio equivalente es de 0.25. Rice Husk cookstove, Joe James (2014).

$$\begin{aligned} 0.25 &= \frac{\frac{\text{Aire primario}}{\text{Cascarilla de Arroz}}}{\frac{\text{Aire Estequiométrico}}{\text{Cascarilla de arroz estequimétrica}}} \\ &= \frac{\frac{\text{Aire primario}}{1.248 \text{ kg de cascarilla de arroz}}}{\frac{7.771 \text{ kg de aire}}{1.248 \text{ cascarilla de arroz}}} \end{aligned}$$

La cantidad de aire primario necesaria sería

$$\text{Aire primario} = 0.25 * 7.711 = 1.928$$

Por tanto, el aire secundario necesario es

$$\text{Aire secundario} 7.771 - 1.928 = 5.843 \text{ kg aire}$$

Razón de aire

$$\text{Razón de Aire} = \frac{\text{Aire secundario}}{\text{Aire primario}} = \frac{5.843}{1.928} = 3.03$$

Posteriormente para el dimensionamiento de la estufa se tomará el procedimiento establecido por en el manual de la gasificadora de arroz del Ph.D. Alexis Belonio, para ello es requerido determinar la energía que se deberá suministrar a la estufa para la cocción de los alimentos, energía liberada, el diámetro del reactor, el tiempo de consumo de la biomasa.

Energía necesaria. - Esta energía es la cantidad de calor que es necesario suministrar a la estufa. Se puede determinar a partir de la cantidad de comida a cocinar o la cantidad de agua a hervir.

Tabla 17. Energía para cocinar alimentos para agua en ebullición

| Alimento | Calor Específico [Kcal/Kg-°C] | Energía total Necesaria [Kcal/kg]* |
|-----------|-------------------------------|------------------------------------|
| Arroz | 0,42 - 0,44 | 79,3 |
| Carne | 0,48 - 0,93 | 56,5 |
| Vegetales | 0,93 | 74,5 |
| Agua | 1 | 72 |

(*A una diferencia de temperatura de 72°C)

Fuente: Manual de Estufa Gasificadora para Cascarilla de arroz

La cantidad de **Energía necesaria** se determina a través de la siguiente expresión

$$Qn = \frac{Mc \times Es}{T} \quad \text{(Ecuación 3)}$$

Donde:

Qn = el calor necesario en Kcal/hr

Mc = la masa de la comida en kg

Es = la energía específica en Kcal/kg

T = el Tiempo de cocción en horas

Amanera de ejemplo, para determinar la energía requerida en el proceso de cocción de una sopa, es necesario tomar las siguientes consideraciones

:

Se llevará 5 litros de agua a ebullición en un tiempo de 10 min

Se cocinará 1kg carne por 30 minutos

Se cocinarán 0.3 kg de vegetales por 10 min

$$Qn = \frac{5 \times 72}{10} + \frac{1 \times 56.5}{25} + \frac{0.3 \times 56.5}{8} = 2600 \frac{Kcal}{h}$$

Energía entrante. - Este término se refiere a la cantidad de energía que será liberada por el combustible, por tanto, se refiere a la cantidad de combustible que se deberá tener en la estufa para generar el calor necesario (Q_n) en el proceso.

$$FCR = \frac{Q_n}{HV_f \times \eta_g} \quad (\text{Ecuación 4})$$

Siendo;

FCR = Razón de Consumo de Combustible en kg/hr

Q_n = Calor necesario en Kcal/hr

HV_f = poder calorífico del combustible en Kcal/kg

η_g = eficiencia de la gasificadora en %

Para el análisis se tomará un poder calorífico de 3000 kcal/kg y una eficiencia de la estufa de 17%

$$FCR = \frac{2600}{3000 \times 0.17} = 5.1 \text{ kg por h}$$

Diámetro del Reactor. – Es el diámetro interno de la cámara donde se combustionará la cascarilla biomasa. Este diámetro viene dado en función de la cantidad de combustible consumida por hora (FCR) para la tasa de gasificación la cual se toma en un rango entre 110 – 210 kg/m²-hr por lo que se tomará el promedio de este rango.

$$D = \left(\frac{1.27 FCR}{SGR} \right)^{0.5} \quad (\text{Ecuación 5})$$

Siendo;

D = Diámetro del reactor en m

FCR = Razón de Consumo de Combustible en kg/hr

SGR = Razón específica de gasificación de la cascarilla de arroz, entre 110 – 210 kg/m²-hr, se tomó 160 kg/m²-hr

Por lo tanto;

$$D = \left(\frac{1.27 \times 5.1}{160} \right)^{0.5} = 0.20 \text{ m}$$

Altura del reactor. – Se determina a través de la combustión de la biomasa, razón específica de gasificación, densidad y tiempo de combustión.

$$H = \frac{SGR \times T}{\rho_{cA}} \quad (\text{Ecuación 6})$$

Siendo;

H = Altura del reactor en m

SGR = Razón específica de gasificación de la biomasa en kg/m²-hr

T = Tiempo requerido para consumir la cascarilla de arroz en hr

ρ_{cA} = Densidad de la cascarilla de arroz en kg/m³

Para este diseño se considerará un tiempo de 30 min y una densidad de la biomasa de 100 kg/M3

$$H = \frac{160 \times 0.5}{100} = 0.8m$$

Tiempo para consumir la cascarilla de arroz. - El tiempo total requerido para gasificar completamente la cascarilla de arroz dentro del reactor. Esto incluye el tiempo de ignición del combustible y el tiempo para generar el gas, adicional, el tiempo que tardara en combustionar todo el combustible en el reactor.

$$T = \frac{\rho_{cA} \times Vr}{FCR} \quad (\text{Ecuación 7})$$

Siendo;

T = Tiempo requerido para consumir la cascarilla de arroz en hr

Vr = Volumen del reactor en m³

ρ_{cA} = Densidad de la cascarilla de arroz en kg/m³

FCR = Razón de Consumo de Combustible en kg/hr

Por lo tanto el tiempo de consumo es:

$$T = \frac{100 \times 0.02738}{5.1} = 0.49 \text{ hr}$$

Cantidad de aire necesaria para la gasificación. – Se refiere a la cantidad de aire necesaria para gasificar la biomasa. Para este cálculo se utilizará la razón el aire estequiométrico para la cascarilla de arroz con una razón equivalente de 0.3.

$$AFR = \frac{\varepsilon \times FCR \times SA}{\rho_a} \quad (\text{Ecuación 8})$$

Donde

AFR = Razón de flujo de aire m³/hr

ε = ratio equivalente, 0.3 a 04 se usó 0.3

FCR = Razón de Consumo de Combustible en kg/hr

SA = Aire estequiométrico de la cascarilla de arroz

ρ_a = Densidad del aire, 1.25 kg/m³

Por lo tanto, la razón de flujo de aire es:

$$AFR1 = \frac{0.3 \times 5.1 \times 1.928}{1.25} = 1.96 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$AFR2 = \frac{0.3 \times 5.1 \times 5.84}{1.25} = 5.95 \text{ m}^3/\text{h}$$

Velocidad superficial. – Es velocidad del flujo de aire a través de combustible dentro del reactor. Esto será importante para producir la gasificación.

$$V_s = \frac{4 AFR}{\pi \times D^2} \quad (\text{Ecuación 9})$$

Siendo;

V_s = Velocidad del aire superficial en m/s

AFR = Razón de flujo de aire m³/hr

D = Diámetro del reactor en m

Es así que la velocidad superficial será;

$$Vs1 = \frac{4 \times 1.96}{\pi \times 0.21^2} \times \frac{1000}{3600} = 1.71 \text{ cm/seg}$$

$$Vs2 = \frac{4 \times 5.95}{\pi \times 0.21^2} \times \frac{1000}{3600} = 5.2 \text{ cm/seg}$$

2.2.3 Análisis térmico

Para poder analizar detenidamente y con exactitud la transferencia de calor en la estufa, se hace necesario determinar lo siguiente

- Calor transferido al cilindro exterior, la radiación
- Radiación dentro de la cámara de combustión
- Y la convección al recipiente de cocción

En la figura 2.3. se muestra cada una de las secciones que se realizará el análisis de transferencia de calor.

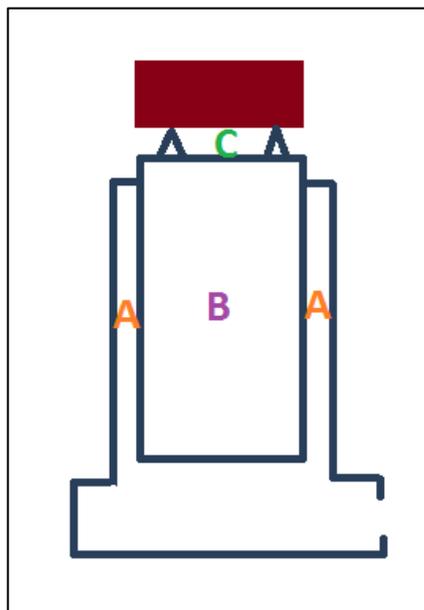


Figura 2.3. Análisis de transferencia de calor

Fuente: Elaboración propia

Sección A

Para el análisis de la transferencia de calor en la parte externa de la estufa (A) se debe de tener en cuenta que existen dos tipos de transferencia de energía; la radiación en la cámara de combustión y la convección que causa el aire secundario al fluir entre el cilindro exterior y la cámara de combustión. Para ello la estufa se puede evaluará como un modelo de dos cilindros concéntricos de longitud infinita.

Por otro lado, el calor total de salida será igual a la suma del calor de convección y el de radiación.

Por lo tanto, el calor de radiación convección en la sección a se determinan con las siguientes ecuaciones

$$q_{rad} = \frac{\sigma A_1 (T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_2} \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2} \quad (\text{Ecuación 10})$$

$$q_{convec} = hA(T_1 - T_2) \quad (\text{Ecuación 11})$$

σ = Constante de radiación de Stefan Boltzmann

ε = Emisividad del material (acero)

T_1 = Temperatura de la pared del reactor

T_2 = Temperatura de la pared del cilindro exterior

A_1 = Área lateral del reactor

r_1 = Radio del reactor

r_2 = Radio del cilindro exterior

h = Coeficiente convectivo

A = Área de transferencia de calor

Análisis de la convección

Debido a que la biomasa se combustiona dentro del reactor, existirá transferencia de calor por convección desde la biomasa a la pared interior del reactor la cual se puede analizar de la siguiente manera:

(a) Convección de la biomasa a la pared del reactor.

Para el análisis de determinará la temperatura con los siguientes datos:

$$T_{dentro\ del\ reactor} = 811^{\circ}C$$

$$T_{fuera\ del\ reactor} = 445^{\circ}C$$

$$T_f = \frac{811 + 445}{2} = 628^{\circ}C$$

Donde T_f en Kelvins es 901 K

Se obtienen los datos necesarios en la tabla de aire adjunta en el apéndice

B

Aire @901 K:

$$Pr = 0.72$$

$$k = 62 \times 10^{-3} \text{ W/mK}$$

$$\nu = 102.9 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$V = 0.047 \text{ m/s}$$

Se procede a calcular el número de Reynolds a partir de la siguiente ecuación

$$Re = \frac{VxD}{\nu} \quad (\text{Ecuación 12})$$

Donde

V: Es la velocidad del aire que fluye en el reactor

D: Diámetro del reactor

ν : Viscosidad cinemática del aire a 901 K

Al reemplazar los valores

$$Re = \frac{0.047 \text{ m/s} \times 0.20 \text{ m}}{102.9 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}} 91.35$$

De acuerdo a los cálculos el flujo tiene un comportamiento laminar, por lo tanto se aplica la siguiente ecuación para determinar el número de Nusselt.

$$Nu_D = \frac{hD}{K_f} \quad (\text{Ecuación 13})$$

$$Nu_D = 4.36$$

Donde

h: El coeficiente de convección

D: Diámetro del reactor

Kf: Conductividad térmica del aire a 901 K

Reemplazando los valores para encontrar h

$$h = \frac{Nu_D K_f}{D}$$

$$h = \frac{4.36 \times 62 \times 10^{-3} \text{ W/mK}}{0.20 \text{ m}}$$

$$h = 1.36 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Ahora se procede a calcular el calor por convección con la siguiente ecuación

$$Q_{conv1} = hA_s(T_2 - T_1)$$

Donde

h: Coeficiente de convección

As: Área por donde fluye el aire

T2: Temperatura dentro del reactor

T1: Temperatura en la pared del reactor

Para calcular As utilizaremos el área lateral de un cilindro mediante la siguiente expresión.

$$A_s = 2\pi r h \quad (\text{Ecuación 14})$$

Donde

As: Área lateral

r: Radio del cilindro

h: altura del cilindro

Al reemplazar los valores

$$A_s = 2\pi \times 0.1 \times 0.8 = 0.50 \text{ m}^2$$

Calculando el calor por convección

$$Q_{conv1} = 1.35 \text{ W/m}^2\text{K} (0.50 \text{ m}^2) (811 \text{ K} - 445 \text{ K})$$

$$Q_{conv1} = 247.05 \text{ W}$$

(b) Convección de la pared del reactor al cilindro exterior

Al estar combustionandose la biomasa dentro del reactor, existe transferencia de calor por convección de esta hacia la pared del reactor, por tanto, la pared del reactor entrega calor por convección a la pared del cilindro exterior este calor se obtiene así:

Para el análisis se determina la temperatura

$$T_{\text{pared del reactor}} = 445 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_{\text{pared del cilindro exterior}} = 129 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_f = \frac{129 + 445}{2} = 287^{\circ}\text{C}$$

Donde T_f en Kelvins es 560 K

Se obtienen datos del aire a T_f de la tabla de vapor adjunta en el apéndice B

Aire @560 K:

$$v = 45.57 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$Pr = 0.683$$

$$k = 44.3 \times 10^{-3} \text{ W/mK}$$

$$V = 0.0471 \text{ m/s}$$

Por tanto, se procede a calcular el número de Reynolds a partir de la siguiente ecuación

$$Re = \frac{VxDh}{v}$$

Donde

V: Es la velocidad del aire que fluye en el reactor

Dh: Diámetro exterior – diámetro exterior de la estufa

v: Viscosidad cinemática del aire a 560K

Al reemplazar los valores

$$Re = \frac{0.047 \text{ m/s} \times (0.33 - 0.23) \text{ m}}{45.57 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}} = 103.13$$

De acuerdo a los cálculos el flujo tiene un comportamiento laminar, por lo tanto, se aplica la siguiente ecuación para determinar el número de Nusselt.

$$Nu_D = \frac{hD}{K_f} = 4.36$$

Donde

h: El coeficiente de convección

D: Diámetro del reactor-Diámetro exterior de la estufa

K_f: Conductividad térmica del aire a 560 K

Al reemplazar los valores en la ecuación anterior se tiene:

$$h = \frac{Nu_D K_f}{D}$$

$$h = \frac{4.36 \times 44.3 \times 10^{-3} \text{ W/mK}}{0.20 \text{ m}}$$

$$h = 1.00 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Se procede a calcular el calor por convección con la siguiente ecuación

$$Q_{conv2} = hA_s(T_2 - T_1)$$

Donde

h: Coeficiente de convección

A_s: Área por donde fluye el aire

T₂: Temperatura de la pared del reactor

T₁: Temperatura en la pared del cilindro exterior

Para calcular A_s tenemos que recurrir al área lateral de un cilindro mediante la siguiente fórmula.

$$A_s = 2\pi r h$$

Donde

A_s: Área lateral

r: Radio del cilindro

h: altura del cilindro

Al reemplazar los valores

$$A_s = 2\pi \times 0.1 \times 0.8 = 0.50 \text{ m}^2$$

Calculando el calor por convección

$$Q_{conv2} = 1.00 \text{ W/m}^2\text{K} (0.50\text{m}^2)(445\text{K} - 129\text{K})$$

$$Q_{conv2} = 158 \text{ W}$$

(c) Convección de la pared cilindro exterior de la estufa al medio ambiente

El cilindro exterior de la estufa estará a una temperatura mayor que la temperatura ambiente, por tanto, existirá transferencia de calor por convección de la pared del cilindro exterior de la estufa al medio ambiente.

Para este análisis se determina la temperatura

$$T_{\text{ambiente}} = 27^\circ\text{C}$$

$$T_{\text{pared del cilindro exterior}} = 129^\circ\text{C}$$

$$T_f = \frac{129 + 27}{2} = 78^\circ\text{C}$$

Llevando a T absoluta sería 351 K

Se obtienen los datos a esta temperatura de la tabla de aire adjunta en el apéndice B

Aire @351 K:

$$v = 20.92 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$Pr = 0.700$$

$$k = 30.0 \times 10^{-3} \text{ W/mK}$$

$$V = 0.047 \text{ m/s}$$

Se procede a calcular el número de Reynolds a partir de la siguiente ecuación

$$Re = \frac{VxDh}{v}$$

Donde

V: Es la velocidad del aire que fluye en el reactor

Dh: Diámetro exterior de la estufa

ν : Viscosidad cinemática del aire a 351K

Al reemplazar los valores

$$Re = \frac{0.047 \text{ m/s} \times 0.30 \text{ m}}{20.92 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}} = 673.99$$

De acuerdo a los cálculos el flujo tiene un comportamiento laminar, por tanto, para obtener el número de Nusselt se utiliza la siguiente ecuación:

$$Nu_D = \frac{hD}{K_f} = 4.36$$

Donde

h: El coeficiente de convección

D: Diámetro del reactor

K_f : Conductividad térmica del aire a 351 K

Reemplazando los valores para encontrar h

$$h = \frac{Nu_D K_f}{D}$$

$$h = \frac{4.36 \times 30 \times 10^{-3} \text{ W/mK}}{0.30 \text{ m}}$$

$$h = 0.43 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Ahora se procede a calcular el calor por convección con la siguiente ecuación

$$Q_{conv3} = hA_s(T_2 - T_1)$$

Donde

h: Coeficiente de convección

A_s : Área por donde fluye el aire

T_2 : Temperatura de la pared exterior de la estufa

T_1 : Temperatura ambiente

Para calcular A_s tenemos que recurrir al área lateral de un cilindro mediante la siguiente fórmula.

$$A_s = 2\pi rh$$

Donde

As: Área lateral

r: Radio del cilindro

h: altura del cilindro

Al reemplazar los valores

$$A_s = 2\pi \times 0.15 \times 0.8 = 0.75m^2$$

Calculando el calor por convección:

$$Q_{conv1} = 0.43 \frac{W}{m^2K} (0.75m^2)(129K - 27K)$$

$$Q_{conv3} = 32.89 W$$

(d) Radiación desde la biomasa a la pared del reactor

Existe radiación desde la pared del reactor a la pared del cilindro exterior este fenómeno térmico se puede obtener usando la siguiente ecuación:

$$q_{rad} = \frac{\sigma A_1(T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_2} \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2}$$

Dónde:

σ = Constante de radiación de Stefan Boltzmann

ε = Emisividad del material (acero)

T_1 = Temperatura de la pared del reactor

T_2 = Temperatura de la pared del cilindro exterior

A_1 = Área lateral del reactor

r_1 = Radio del reactor

r_2 = Radio del cilindro exterior

Para calcular el área lateral tomamos una porción del reactor donde existe transferencia de calor por radiación al estar la biomasa en combustión.

Entonces el área lateral es la siguiente:

Al reemplazar los valores tenemos lo siguiente:

$$A_1 = 2\pi hr$$

Dónde:

h = Altura de combustión de la biomasa 0.05m

r = Radio del reactor

Reemplazando los valores se obtiene:

$$A_1 = 2\pi(0.05m)(0.115m)$$

$$A_1 = 0.036m^2$$

Por tanto se puede obtener el calor por radiación

$$q_{rad} = \frac{5.67 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4} (0.036m^2)(718.4K^4 - 402.2K^4)}{\frac{1}{0.62} + \frac{1 - 0.62}{0.62} \left(\frac{0.115}{0.165}\right)^2}$$

$$q_{rad} = 256 W$$

Sección B

Se analiza el interior de la cámara de combustión, por lo tanto, se comprende el calor por radiación, modelado en la siguiente configuración tal como se muestra en la figura 2.4.

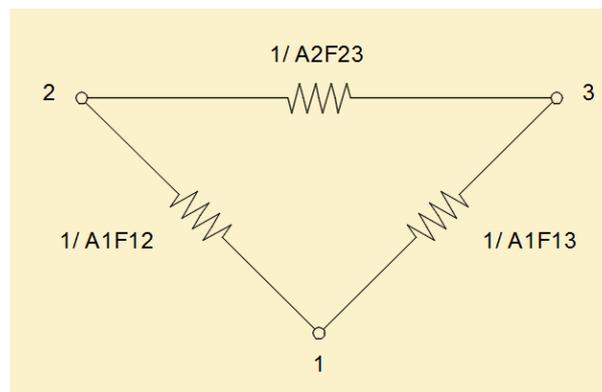


Figura 2.4. Circuito de radiación en las paredes de la cámara de combustión

Fuente: Elaboración propia

Por consiguiente, los calores de radiación en las paredes se expresan de la siguiente manera.

$$Q_1 = \frac{J_1 - J_2}{\frac{1}{A_1 F_{12}}} + \frac{J_1 - J_3}{\frac{1}{A_1 F_{13}}} \quad \text{(Ecuación 15)}$$

$$Q_2 = \frac{J_2 - J_1}{\frac{1}{A_1 F_{12}}} + \frac{J_2 - J_3}{\frac{1}{A_2 F_{23}}}$$

$$Q_3 = \frac{J_3 - J_1}{\frac{1}{A_1 F_{13}}} + \frac{J_3 - J_2}{\frac{1}{A_2 F_{23}}}$$

Con las ecuaciones para J de la siguiente manera:

$$J_1 = \sigma T_1^4 ; J_2 = \sigma T_2^4 ; J_3 = \sigma T_3^4$$

Donde

J = Potencia emisiva hemisférica total

σ = Constante de Stefan Boltzmann $5.67 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$

$T_{1,2,3}$ = Corresponden a las temperaturas de superficie de la biomasa, reactor y superficie de la olla respectivamente.

$A_{1,2}$ = Corresponden a las áreas de la sección circular del reactor y de la superficie expuesta a la llama respectivamente.

Reemplazando cada uno de los valores se obtiene lo siguiente:

$$T_1 = 1052 K$$

$$T_2 = 778.6 K$$

$$T_3 = 718.4 K$$

$$J_1 = 5.67 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4} (1052 K)^4 = 69.44 \frac{KW}{m^2}$$

$$J_2 = 5.67 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4} (778.6 K)^4 = 20.83 \frac{KW}{m^2}$$

$$J_3 = 5.67 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4} (718.4 K)^4 = 15.10 \frac{KW}{m^2}$$

Las variables F_{12}, F_{13}, F_{23} corresponden a los factores de forma y según el texto Fundamentos de Transferencia de Calor [Incropera, D Witt] puede ser calculado utilizando la geometría interna de la cámara de combustión. Por lo tanto, F12 puede ser obtenido utilizando la relación entre dos discos de diferentes tamaños paralelos y axiales de R1 y R2.

$$R_1 = \frac{r_1}{a_1} ; R_2 = \frac{r_2}{a_2} \quad \text{(Ecuación 16)}$$

$$x = 1 + \frac{1+R_2^2}{R_1^2} \quad \text{(Ecuación 17)}$$

$$F_{12} = \frac{1}{2} \left[x - \sqrt{x^2 - 4 \left(\frac{R_1}{R_2} \right)^2} \right] \quad (\text{Ecuación 18})$$

$$A_1 F_{12} = A_2 F_{21} \quad (\text{Ecuación 19})$$

Dónde:

r_1 = Radio del recipiente expuesto a la llama

r_2 = Radio del reactor

a_1 = Area de la sección expuesta a la llama

a_2 = Area de la sección circular del reactor

Reemplazando los datos se obtiene que:

$$a_1 = \pi \frac{(0.25m)^2}{4} = 0.049m^2$$

$$a_2 = \pi \frac{(0.23m)^2}{4} = 0.041m^2$$

$$R_1 = \frac{0.125m}{0.049m^2} = 2.55m^{-1}$$

$$R_2 = \frac{0.115m}{0.041m^2} = 2.80m^{-1}$$

$$x = 1 + \frac{1 + (2.80m^{-1})^2}{(2.55m^{-1})^2} = 2.35$$

El factor de forma será el siguiente:

$$F_{12} = \frac{1}{2} \left[2.35 - \sqrt{(2.35)^2 - 4 \left(\frac{2.55}{2.80} \right)^2} \right]$$

$$F_{12} = 0.435$$

Así se puede concluir que:

$$A_1 F_{12} = A_2 F_{21}$$

De la regla de la suma de los factores de forma se tiene que:

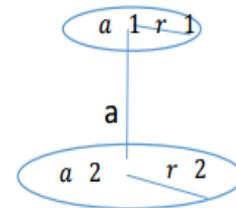
$$F_{12} + F_{23} + F_{13} = 1$$

El factor de forma F_{23} es igual al factor de forma F_{13} al ser geoméricamente desde un cilindro a una sección circular por esta razón seda lo siguiente:

$$F_{12} + 2F_{23} = 1$$

$$0.435 + 2F_{23} = 1$$

$$F_{23} = \frac{1 - 0.435}{2} = 0.282$$



Por lo tanto, se puede concluir que $F_{23} = F_{13}$, entonces se tiene lo siguiente:

$$F_{12} = 0.435$$

$$F_{13} = 0.282$$

$$F_{23} = 0.282$$

Para calcular las áreas A_1, A_2 se utiliza la siguiente ecuación:

A_1 = Área de la sección circular del reactor

$$A_1 = \pi \frac{(0.23m)^2}{4} = 0.041m^2$$

$$A_2 = \pi \frac{(0.25m)^2}{4} = 0.049m^2$$

Al establecer todas las variables se procede a calcular el calor por radiación en la sección B utilizando las siguientes ecuaciones:

$$Q_1 = \frac{\frac{69.44 \frac{KW}{m^2} - 20.83 \frac{KW}{m^2}}{1}}{0.041m^2 \cdot 0.435} + \frac{\frac{69.44 \frac{KW}{m^2} - 15.10 \frac{KW}{m^2}}{1}}{0.041m^2 \cdot 0.282} = 1.5KW$$

$$Q_2 = \frac{\frac{20.83 \frac{KW}{m^2} - 69.44 \frac{KW}{m^2}}{1}}{0.041m^2 \cdot 0.435} + \frac{\frac{20.83 \frac{KW}{m^2} - 15.10 \frac{KW}{m^2}}{1}}{0.049m^2 \cdot 0.282} = 0.79KW$$

$$Q_3 = \frac{\frac{15.10 \frac{KW}{m^2} - 69.44 \frac{KW}{m^2}}{1}}{0.041m^2 \cdot 0.282} + \frac{\frac{15.10 \frac{KW}{m^2} - 20.83 \frac{KW}{m^2}}{1}}{0.049m^2 \cdot 0.282} = 0.89KW$$

Por lo tanto, Qt será igual a:

$$Qt = 1.5 + 0.79 + 0.89 - 0.256 - 0.2475 - 0.158 - 0.0328 = 2.5KW$$

2.3 Construcción del prototipo de la estufa

El proceso de construcción del prototipo de la estufa, se basa en los planos previamente dibujados como se puede ver en el apéndice A con las dimensiones antes determinadas. El material utilizado para la construcción del prototipo es plancha de Acero ASTM-A36 de 3 mm de espesor, siendo cortada y rodada para posteriormente ser ensamblada. Para unir y fijar cada una las partes de la estufa se procede a soldar el equipo. El reactor de la estufa está construido con plancha ASTM-A36 agujereada. Los agujeros tienen un diámetro de 1 mm. Este diámetro de agujeros permitirá sostener la biomasa, además permite el ingreso de aire. En la tabla 18 se muestra cada componente de la estufa y el material con el que fue construido el prototipo.

Tabla 18. Tabla de componentes y materiales usados en la construcción del prototipo

| Componente de la estufa | Material utilizado en la construcción |
|---------------------------|--|
| Reactor | Plancha de acero ASTM-A36 con agujereada 1 mm diámetro y un paso de 2 mm y espesor de 3 mm |
| Cilindro exterior | Plancha de acero ASTM-A36 mm de espesor 3 mm |
| Cilindro porta recipiente | Plancha de acero ASTM-A36 mm de espesor 3mm |

Fuente: Elaboración propia

A continuación, se muestra el proceso de construcción del prototipo

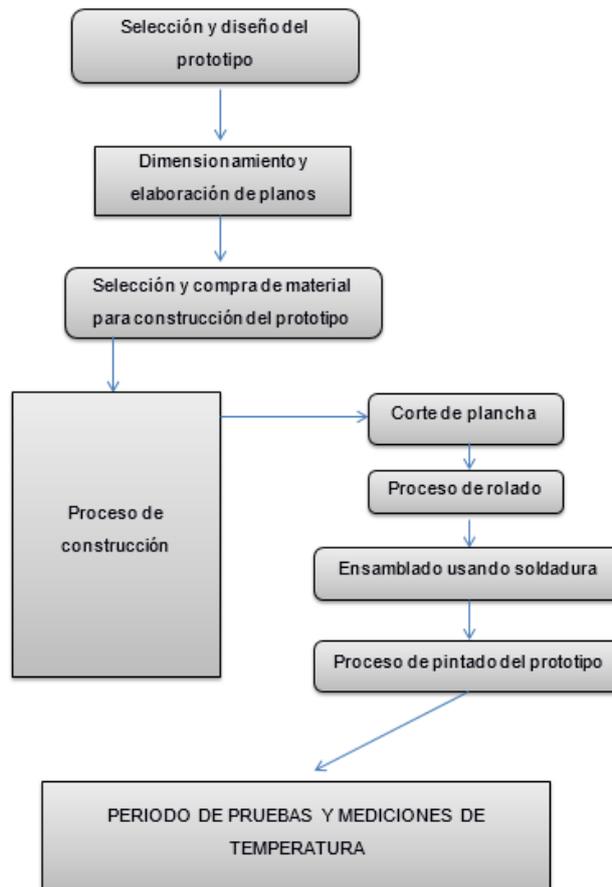


Figura 2.5. Diagrama de flujo del proceso de construcción

Fuente: Elaboración propia

A continuación, en la Figura 2.6. se muestra construido el prototipo de la estufa



Figura 2.6. Prototipo de estufa doméstica

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 2.7. Se puede apreciar el interior de la estufa, el reactor, el cual fue construido con plancha agujereada



Figura 2.7. Reactor del prototipo

Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO 3

3. PRUEBAS DE CAMPO DEL PROTOTIPO DE LA ESTUFA

Las pruebas de campo de la estufa fueron realizadas en un periodo adecuado a fin de verificar el correcto funcionamiento de la estufa. A continuación, se detallan los equipos y la metodología y las composiciones de biomasa utilizadas en las pruebas:

a) Equipos

Para el proceso de mediciones y pruebas se utilizaron los siguientes equipos
Termocupla. - Para medir las altas temperaturas que se generan dentro del reactor y para medir las temperaturas tanto en la estufa como en el recipiente de cocción que se usó en las pruebas

Balanza. - Para medir el peso de la biomasa dentro del reactor y así poder relacionar la cantidad de biomasa utilizada con el tiempo de combustión.

Cronómetro. - Utilizado para medir el tiempo que la biomasa tarda en combustionar dentro del reactor de la estufa

b) Metodología de medición

Para realizar las pruebas de campo se tomaron diferentes variables para definir la eficiencia de la estufa, dichas variables fueron las siguientes:

- Peso de biomasa
- Tiempo de consumo de biomasa
- Temperaturas en la estufa y en la olla

La medición del peso de la biomasa se toma antes de introducirla en el reactor hasta que esta llegue al punto de llenado, este valor es un indicador del tiempo que dure la combustión de la biomasa, ya que la densidad de la misma generará un impacto directo en esta variable.

El tiempo de consumo de la biomasa con el reactor llenado hasta el nivel máximo es una variable esencial de las pruebas, ya que esta nos determina la autonomía de la estufa para su funcionamiento, puesto que, para poder

funcionar correctamente, la estufa, debe lograr alcanzar el mínimo tiempo necesario para cocinar los alimentos sin necesidad de recargarla antes de este tiempo.

Las temperaturas en la estufa y la olla se miden con termocupla, tomando 5 mediciones para cada una de las partes de la estufa para obtener el promedio de cada una de las variables medidas, y estos resultados son usados en el análisis de transferencia de calor. En la figura 3.1 se muestran los puntos en los cuales se tomaron las mediciones de temperatura.

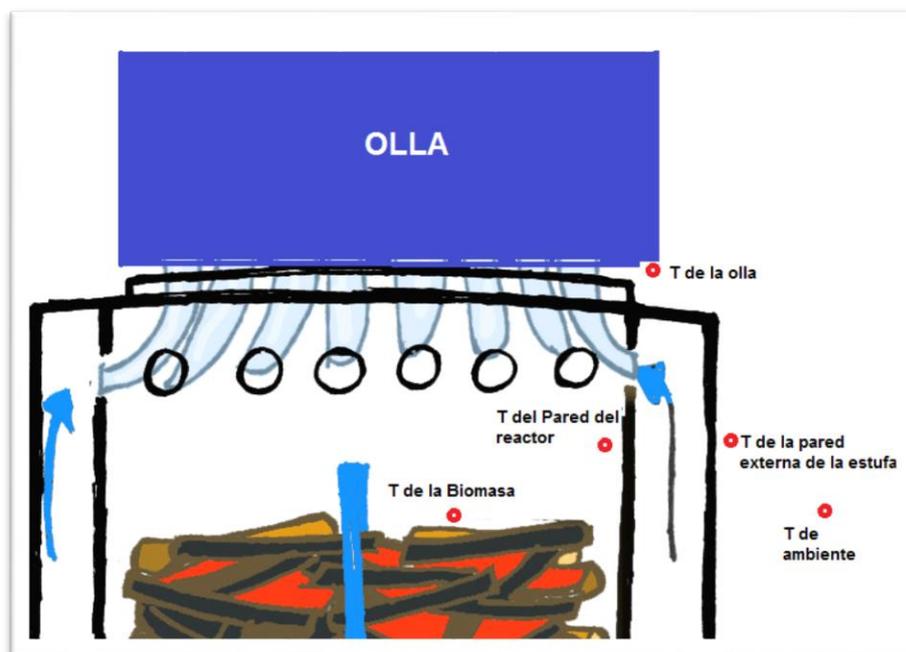


Figura 3.1. Puntos de medición de temperaturas

Fuente: <http://www.envirotorns.com/images/Gasifier.gif>

c) Composición de biomasa sólida

Para las pruebas se utilizó 3 tipos de biomasa sólida, de las cuales dos son compuestas. A continuación, se presentan los porcentajes de las composiciones de biomasa sólida utilizados:

- 100% cascarilla de arroz
- Mezcla de 80 % de hojarasca, 20% de cascarilla de arroz
- Mezcla de 90 % de residuos de árboles (ramas secas), 10% de hojarasca

3.1 Resultados

Los resultados basados en el funcionamiento de la estufa con diferentes tipos de biomasa sólida, se presentan los tres tipos de pruebas realizadas, las mediciones de temperatura con termocuplas y el tiempo de consumo de biomasa en el reactor.

Prueba N°1

Para la prueba N°1 se llenó el reactor con cascarilla de arroz como se muestra en la Figura 3.2. La tabla 19 muestra los valores de las mediciones realizadas.



Figura 3.2 Prueba N°1 con cascarilla de arroz

Fuente: Elaboración propia

Tabla 19. Medición de temperaturas obtenidas de prueba del prototipo de la estufa con 100% cascarilla de arroz como combustible.

| Medición N ^a | Composición de biomasa sólida | T ambiente [°C] | T de biomasa [°C] | T de la pared del reactor [°C] | T de la pared externa de la estufa [°C] | T de la olla [°C] |
|-------------------------|-------------------------------|-----------------|-------------------|--------------------------------|---|-------------------|
| 1 | Cascarilla de arroz | 27 | 820 | 470 | 135 | 507 |
| 2 | | | 789 | 458 | 128 | 499 |
| 3 | | | 832 | 435 | 129 | 508 |
| 4 | | | 789 | 448 | 132 | 512 |
| 5 | | | 795 | 472 | 134 | 502 |
| Promedio | | | 805 | 456,6 | 131,6 | 505,6 |

Fuente: Elaboración propia

Como resultado de esta prueba se determinó que para un peso de biomasa de 1420 g se obtuvo un tiempo de combustión de 27 minutos el cuál es aproximado al tiempo requerido de cocción establecido en la sección 2.2.2.

Prueba 2

Para la prueba N°2 el reactor se llenó con una mezcla de biomasa de 80% de hojarasca y 20% de cascarilla de arroz como se muestra en la figura 3.3 La tabla 20 muestra los valores de las mediciones realizadas.



Figura 3.3. Prueba N°2 Con hojarasca y cascarilla de arroz

Fuente: Elaboración propia

Tabla 20. Temperaturas de prueba del prototipo de la estufa con mezcla de 20% de cascarilla de arroz y 80% de hojarasca como biomasa.

| Medición N ^a | Composición de biomasa sólida | T ambiente [°C] | T de biomasa [°C] | T de la pared del reactor [°C] | T de la pared externa de la estufa [°C] | T de la olla [°C] |
|-------------------------|---|-----------------|-------------------|--------------------------------|---|-------------------|
| 1 | Cascarilla de arroz 20% y hojarasca 80% | 27 | 815 | 471 | 132 | 499 |
| 2 | | | 796 | 462 | 129 | 508 |
| 3 | | | 799 | 458 | 127 | 510 |
| 4 | | | 820 | 445 | 132 | 511 |
| 5 | | | 814 | 465 | 134 | 506 |
| Promedio | | | 808,8 | 460,2 | 130,8 | 506,8 |

Fuente: Elaboración propia

Como resultado de esta prueba se determinó que para un peso de biomasa de 716 g se obtuvo un tiempo de combustión de 9 minutos, por lo que para alcanzar el tiempo de combustión requerido para la cocción establecida en la sección 2.2.2 se necesitarían 2387 g de esta composición de biomasa.

Prueba N°3

Para la prueba N°3 el reactor se llenó con una mezcla de biomasa de 90% ramas secas y 10 % de hojarasca como se muestra en la figura 3.4 La tabla 21 muestra los valores de las mediciones realizadas.



Figura 3.4. Prueba N°3 con ramas secas y hojarasca

Fuente: Elaboración propia

Tabla 21. Temperaturas de prueba del prototipo de la estufa con mezcla de 90% de ramas secas y 10% de hojarasca como biomasa.

| Medición N ^a | Composición de biomasa sólida | T ambiente [°C] | T de biomasa [°C] | T de la pared del reactor [°C] | T de la pared externa de la estufa [°C] | T de la olla [°C] |
|-------------------------|---------------------------------|-----------------|-------------------|--------------------------------|---|-------------------|
| 1 | Ramas secas 90% y hojarasca 10% | 27 | 841 | 432 | 139 | 500 |
| 2 | | | 817 | 443 | 136 | 492 |
| 3 | | | 720 | 473 | 112 | 503 |
| 4 | | | 741 | 439 | 123 | 516 |
| 5 | | | 777 | 440 | 137 | 517 |
| Promedio | | | 779,2 | 445,4 | 129,4 | 505,6 |

Fuente: Elaboración propia

Como resultado de esta prueba se determinó que para un peso de biomasa de 1508 g se obtuvo un tiempo de combustión de 17 minutos. Por lo que se necesitarían 2661 g de composición de biomasa para alcanzar el tiempo de cocción establecido en la sección 2.2.2.

3.2 Seguridad del uso de la estufa

Del proceso de combustión tenemos dos importantes factores para analizar en cuanto a la seguridad del uso de la estufa, los cuales son el calor generado y las emisiones de combustión.

El diseño de la estufa cuenta con un cilindro metálico mayor al del reactor en la que se genera un aislamiento térmico brindado por el aire entre los dos cilindros, de esta manera se reduce la temperatura externa de la estufa, sin embargo, esta temperatura ronda los 100°C lo cual sigue representando un riesgo de quemaduras para el usuario.

En la estufa gasificadora se cuenta con una combustión controlada, en la que la gasificación y la pirolisis ocurren controladamente, de esta manera, los gases liberados en la gasificación y pirolisis son combustionados, por la llama generada en la parte superior de la biomasa, a diferencia de las estufas convencionales o fogatas en las que varias partes de la biomasa se encuentran en un estado de pirolisis emitiendo gases, pero sin ser combustionados, por lo tanto con la estufa gasificadora, se reduce las emisiones nocivas para el usuario.

3.3 Portabilidad de la estufa

Conforme a las ecuaciones para estufas gasificadoras de arroz del Ph.D. Belonio, las dimensiones resultantes de la estufa generaron una baja portabilidad de la misma, sin embargo, a diferencia de una cocina convencional, la estufa gasificadora puede ser desplazada por el usuario sin riesgos de sobreesfuerzo físico y en comparación con las estufas construidas en barro que no se pueden desplazar, la estufa gasificadora representa una

ventaja ya que puede ser trasladada con facilidad por el usuario. Sin embargo, esto no quiere decir que el dimensionamiento de la estufa represente para el usuario una facilidad de transportación a grandes distancias o en vehículos pequeños.

3.4 Análisis de costos

La construcción de la estufa, de acuerdo a los planos, basados en el diseño de la estufa gasificadora de arroz del Ph.D. Belonio en los materiales seleccionados tiene un costo como se detalla a continuación en la tabla 22

Tabla 22. Análisis de costo de la estufa

| Elemento | Masa [Kg] | Costo por kg [\$/Kg] | Mano de obra [\$/Kg] | Consumibles [\$/Kg] | Pintura [\$/Kg] | Costo [\$] |
|---|--------------|----------------------|----------------------|---------------------|-----------------|--------------|
| Plancha agujereada del reactor | | | | | | |
| Cilindro | 10,00 | 0,67 | 0,50 | 0,18 | 0,13 | 14,80 |
| Disco inferior | 1,00 | | | | | 1,480 |
| Plancha del exterior del reactor | | | | | | |
| Cilindro exterior | 16,35 | 1,00 | 0,50 | 0,18 | 0,13 | 29,59 |
| Anillo superior | 1,17 | | | | | 2,12 |
| Anillo inferior | 0,75 | | | | | 1,36 |
| Cilindro base | 4,10 | | | | | 7,42 |
| disco base | 3,00 | | | | | 5,43 |
| TOTAL | 36,37 | TOTAL | | | | 62,20 |

Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO 4

4. CONCLUSIONES Y DISCUSIÓN

4.1 Conclusiones

Diseño del prototipo experimental

1. Basándose en el criterio de diseño propuesto por el Ph.D. Belonio se obtuvo un prototipo cuyas dimensiones dan como resultado un prototipo semi portátil ya que, la estufa puede ser fácilmente desplazada en comparación a una cocina doméstica convencional.
2. Tomando como referencia la cantidad de calor necesaria en la cocción de determinados alimentos, se realizó el dimensionamiento del reactor para que este pueda contener el volumen de biomasa que se necesita combustiona durante el tiempo necesario para cocinar los alimentos.
3. En base a los resultados obtenidos del análisis de transferencia de calor podemos concluir que para la composición de ramas y hojarascas el calor total transferido y los tiempos de combustión cumplen con los parámetros de diseño, logrando la funcionalidad del prototipo.
4. En el funcionamiento del prototipo existen pérdidas por transferencia de calor, estas son debido a la convección y radiación, las cuales son considerables, sin embargo, la radiación emitida hacia la olla nos proporciona el calor necesario para el funcionamiento adecuado de la estufa a pesar de las pérdidas mencionadas.
5. A fin de evitar pérdidas de calor y proporcionar al usuario una experiencia de uso más segura, se hace necesaria la implementación de un aislante térmico de mayor resistencia que el aire ya que las temperaturas que alcanzan la pared externa de la estufa puede llegar a temperaturas que representen riesgo para el usuario.

Biomasa

6. Los tipos de biomasa sólida analizados son de fácil acceso en las zonas rurales de la provincia del Guayas, ya que la cascarilla de arroz es el mayor residuo agroindustrial generado en esta actividad y así mismo las hojarascas y ramas secas son de fácil recolección en la zona mencionada.

Prueba experimental

7. De acuerdo a los resultados obtenidos en las pruebas de variación de biomasa, se observó que no existe una relación directa entre el peso de la biomasa sólida y el tiempo combustión en el reactor. Así mismo, las pruebas comparativas entre la biomasa de hojarascas con ramas secas y la cascarilla de arroz demostró que la cascarilla de arroz permite un mayor tiempo de combustión con una cantidad en peso menor que la biomasa forestal residual.
8. Las temperaturas obtenidas en los 3 tipos de pruebas fueron similares, sin embargo, El tiempo que estas temperaturas se mantuvieron constantes durante la combustión de la biomasa dentro del reactor dependió del tipo de biomasa que se utilizó.
9. En la prueba con cascarilla de arroz, las temperaturas, durante un periodo de tiempo inicial fueron estables, sin embargo, se observó un decremento en la intensidad de la llama después de un intervalo de tiempo, produciendo mediciones de temperatura menores a las iniciales, sin que se hubiese combustionado en su totalidad la biomasa dentro del reactor.
10. En la prueba con 80% hojarascas y 20 %cascarilla de arroz las temperaturas se mantuvieron constantes en el tiempo hasta que se hubiese combustionado en su totalidad la biomasa dentro del reactor. De igual manera ocurrió con la composición de 90% ramas secas y 10 % hojarascas.

Emisión de la combustión de la biomasa sólida

11. Durante la combustión de la cascarilla de arroz, se generan varias fases de quemado. La fase inicial se produjo una combustión con baja emisión de gases, dicha emisión fue aumentan visiblemente con el tiempo (humo gris), hasta finalizar con una disminución en la intensidad de la llama, permitiendo que no toda la biomasa sea quemada. Esto se produce por la falta de aire o de remoción de la biomasa con la finalidad de alcanzar su máxima capacidad de quemado.
12. Durante la quema de hojarasca y cascarilla de arroz, el proceso de combustión mejoro produciendo un quemado más rápido de biomasa, sin embargo, se observó una emisión constante de humo gris.
13. En la combustión de ramas secas y hojarasca, el proceso de combustión de la mezcla se generó en menor tiempo que las demás pruebas de biomasa, además las emisiones de gases fueron mínimas durante todo el proceso (humo transparente).

4.2 Recomendaciones

1. Debido a la excesiva compactación de la cascarilla de arroz dentro del reactor se genera una combustión incompleta por la falta de aire a través de la biomasa dentro del reactor, por tal motivo, es necesario adaptar el prototipo con un sistema de ventilación forzada usando un ventilador adecuado y un tubo perforado concéntrico al reactor que permita mayor flujo de aire.
2. A fin de incrementar el tiempo de combustión sin alterar las dimensiones obtenidas de acuerdo a los cálculos, se recomienda la adaptación de un alimentador de biomasa, para poder tener un flujo controlado de biomasa y de esta manera poder tener un mayor control en el tiempo de combustión para la cocción de alimentos que tengan mayor requerimiento energético para su cocción.

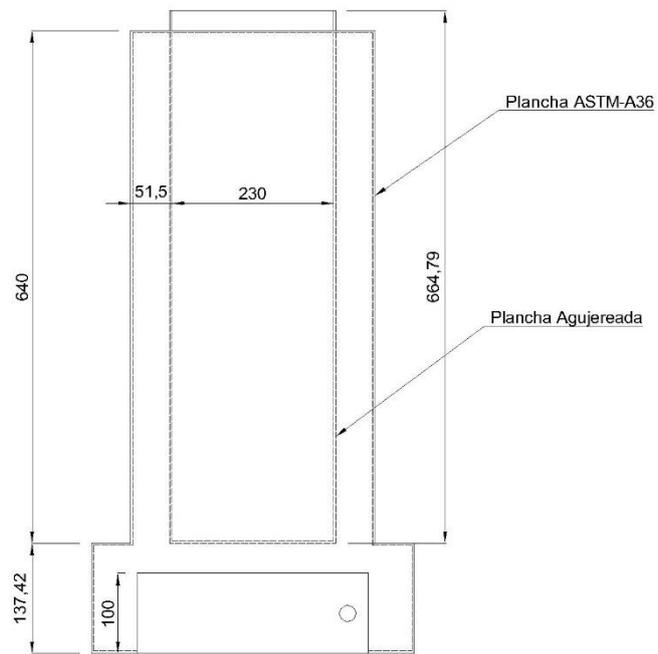
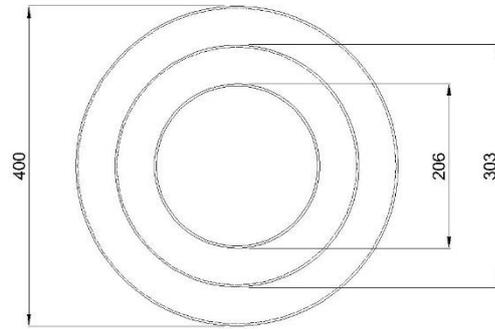
BIBLIOGRAFÍA

1. Eisin, *Atlas bionergético del Ecuador* [en línea], ed. 1, documento electrónico publicado en internet, 2014 [22 de mayo del 2014]
<<http://www.energia.gob.ec/biblioteca/>> .
2. Nogués, Fernando Sebastián ; García-Galindo, Daniel; Rezeau, Adeline;. (2010). *ENERGÍA de a biomasa*. Zaragoza: Cedro.
3. Tthos, *TLUD Stoves in 2011 - Within a Classification of Stoves*, [en línea], documento electrónico publicado en internet, 2011 [22 de mayo del 2016]
4. Evans, I., & Jackson, L. (2006). *Rocket Mass Heaters: Superefficient Woodstoves You Can Build*. North Miami Beach: Cob Cottage Company
5. Incropera, De Witt 4ta edicion (1999), *Fundamentos de Transferencia de Calor*, Juarez Mexico, PRENTICE HALL LATINOAMERICANA.
6. Martinez, Escobar 1era edicion (2016), *CIENCIA DEL CARBÓN. GEOLOGÍA, QUÍMICA, PETROGRAFÍA, GEOQUÍMICA, APLICACIONES*, Zaragoza
7. Aracil, Bahillo Ruiz, Ballesteros 1era Edicion (2015) *TECNOLOGÍAS PARA EL USO Y TRANSFORMACIÓN DE BIOMASA ENERGÉTICA*. Alicante, AMV Ediciones
8. Tolosana Esteban (2009), *MANUAL TÉCNICO PARA EL APROVECHAMIENTO Y ELABORACIÓN DE BIOMASA FORESTAL*, Madrid, AMV Ediciones.
9. Costa, 1era Edicion (2013) , *BIOMASA Y BIOCIMBUSTIBLE*, Madrid, Alianza Ediciones
10. Madrid Vicente, 1era Edicion (2012), *LA BIOMASA Y SUS APLICACIONES ENERGETICAS*, Madrid, Alianza Ediciones

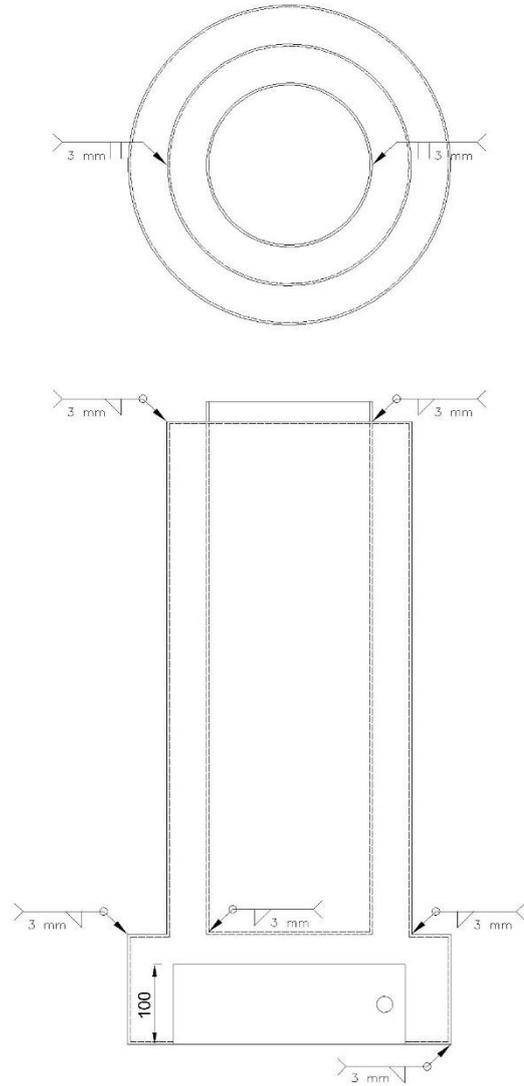
11. Anderson, P. S. (Febrero de 2011). *drtlud.com*. Obtenido de http://ethoscon.com/pdf/ETHOS/ETHOS2011/Anderson_TLUDs2011ClassificationStoves.pdf
12. Anderson, P., Reed, T., & Wever, P. (2007). *Micro Gasification: What it is and why it works*. Illinois: Chio Energy.
13. Yuanchen, C., Shu, S., & Wei, D. (2016). *Efficiencies and pollutant emissions from forced-draft biomass-pellet semi-gasifier stoves: Comparison of International and Chinese water boiling test protocols*. Massachusetts: Elsevier Inc.
14. James, J. (2014). *Rice Husk Gasification Cook Stove*. Akron.
15. Belonio, A. (2005). *Rice Husk Gas Stove Handbook*. Iloilo: Central Philippine University .
16. INEC. (2013). *ANUARIO ESTADÍSTICO 2013*.

APÉNDICES

Apéndice A
Planos Esquemáticos



| | | | |
|------------|----------|---------------------|--|
| Tolerancia | Peso | Materiales | |
| N/A | N/A | ASTM - A36 | |
| | Fecha | Nombre | Plano de construcción de estufa gasificadora |
| Dib. | 5/9/2016 | D. Serrano | |
| Rev. | 5/9/2016 | L. Montoya | |
| Apro | 5/9/2016 | E. Delgado | |
| E.S.P.O.L. | | Estufa Gasificadora | Escala 1:8 Marca de Registro  |



| | | | |
|------------|----------|----------------------|-------------------|
| Tolerancia | Peso | Materiales | |
| N/A | N/A | ASTM - A36 | |
| | Fecha | Nombre | Escala |
| Dib. | 5/9/2016 | D. Serrano | 1:8 |
| Rev. | 5/9/2016 | L. Montoya | |
| Apro | 5/9/2016 | E. Delgado | |
| E.S.P.O.L. | | Detalle de Soldadura | Marca de Registro |

Apéndice B
Propiedades del Aire Seco

Tabla 4.4.1: Propiedades del aire seco a presión atmosférica (cont.)

| T (°C) | ρ (kg/m ³) | c_p (kJ/kg·K) | $\mu \cdot 10^6$ (N·s/m ²) | $\nu \cdot 10^6$ (m ² /s) | $k \cdot 10^3$ (W/m·K) | $\alpha \cdot 10^6$ (m ² /s) | Pr |
|-----------|--------------------------------|--------------------|---|---|---------------------------|--|--------|
| 310 | 0.6054 | 1.047 | 29.68 | 49.03 | 44.79 | 70.7 | 0.6934 |
| 320 | 0.5951 | 1.049 | 30.01 | 50.43 | 45.4 | 72.73 | 0.6934 |
| 330 | 0.5853 | 1.051 | 30.35 | 51.85 | 46.01 | 74.77 | 0.6935 |
| 340 | 0.5757 | 1.054 | 30.68 | 53.29 | 46.61 | 76.83 | 0.6936 |
| 350 | 0.5665 | 1.056 | 31.01 | 54.73 | 47.21 | 78.9 | 0.6937 |
| 360 | 0.5576 | 1.059 | 31.33 | 56.19 | 47.81 | 80.99 | 0.6938 |
| 370 | 0.5489 | 1.061 | 31.65 | 57.67 | 48.4 | 83.09 | 0.694 |
| 380 | 0.5405 | 1.064 | 31.97 | 59.16 | 48.99 | 85.21 | 0.6943 |
| 390 | 0.5323 | 1.066 | 32.29 | 60.66 | 49.57 | 87.34 | 0.6945 |
| 400 | 0.5244 | 1.069 | 32.61 | 62.18 | 50.15 | 89.49 | 0.6948 |
| 410 | 0.5167 | 1.071 | 32.92 | 63.71 | 50.72 | 91.65 | 0.6951 |
| 420 | 0.5093 | 1.073 | 33.23 | 65.25 | 51.29 | 93.83 | 0.6954 |
| 430 | 0.502 | 1.076 | 33.54 | 66.8 | 51.86 | 96.02 | 0.6957 |
| 440 | 0.495 | 1.078 | 33.84 | 68.37 | 52.42 | 98.22 | 0.6961 |
| 450 | 0.4882 | 1.081 | 34.15 | 69.95 | 52.98 | 100.4 | 0.6965 |
| 460 | 0.4815 | 1.083 | 34.45 | 71.54 | 53.54 | 102.7 | 0.6969 |
| 470 | 0.475 | 1.085 | 34.75 | 73.15 | 54.09 | 104.9 | 0.6973 |
| 480 | 0.4687 | 1.088 | 35.04 | 74.77 | 54.64 | 107.2 | 0.6977 |
| 490 | 0.4626 | 1.09 | 35.34 | 76.4 | 55.18 | 109.4 | 0.6982 |
| 500 | 0.4566 | 1.093 | 35.63 | 78.04 | 55.72 | 111.7 | 0.6986 |
| 550 | 0.4289 | 1.104 | 37.07 | 86.44 | 58.37 | 123.3 | 0.7011 |
| 600 | 0.4043 | 1.115 | 38.46 | 95.12 | 60.93 | 135.2 | 0.7037 |
| 650 | 0.3824 | 1.125 | 39.81 | 104.1 | 63.41 | 147.4 | 0.7064 |
| 700 | 0.3628 | 1.135 | 41.11 | 113.3 | 65.81 | 159.8 | 0.7092 |
| 750 | 0.345 | 1.145 | 42.39 | 122.8 | 68.12 | 172.5 | 0.7121 |
| 800 | 0.329 | 1.153 | 43.62 | 132.6 | 70.37 | 185.5 | 0.7149 |
| 850 | 0.3143 | 1.162 | 44.83 | 142.6 | 72.54 | 198.7 | 0.7178 |
| 900 | 0.3009 | 1.169 | 46 | 152.9 | 74.65 | 212.2 | 0.7206 |
| 950 | 0.2886 | 1.177 | 47.15 | 163.4 | 76.7 | 225.8 | 0.7233 |
| 1000 | 0.2773 | 1.184 | 48.26 | 174.1 | 78.68 | 239.8 | 0.726 |
| 1100 | 0.2571 | 1.196 | 50.42 | 196.1 | 82.48 | 268.2 | 0.7312 |
| 1200 | 0.2396 | 1.207 | 52.48 | 219 | 86.09 | 297.6 | 0.736 |
| 1400 | 0.211 | 1.226 | 56.35 | 267.1 | 92.81 | 358.8 | 0.7444 |
| 1600 | 0.1885 | 1.241 | 59.92 | 317.9 | 99.08 | 423.6 | 0.7506 |
| 1800 | 0.1703 | 1.253 | 63.22 | 371.3 | 105.1 | 492.5 | 0.7539 |
| 2000 | 0.1553 | 1.264 | 66.3 | 426.9 | 111.1 | 566.2 | 0.7539 |

Fuente: Todas las propiedades de Keenan, Chao, Keyes, "Gas Tables", Wiley, 1985.

Excepto:

Conductividad de Y.S. Touloukian, P.E. Liley, S.C. Saxena "Thermophysical Properties of Matter - Vol 3", IFI/Plenum, NY, 1970

Viscosidad de Y.S. Touloukian, S.C. Saxena, and P. Hestermans "Thermophysical Properties of Matter - Vol 11", IFI/Plenum, NY, 1970

Apéndice C
Manual de operación de la estufa

Introducción

Esta estufa es de uso doméstico para ser usado en espacios ventilados para aquellas personas que no tengan acceso a combustibles como el glp pero que cuenten con fuente de biomasa sólida, así como para quienes tienen interés en reducir el consumo de combustibles de origen fósil.

Construcción

Está fabricada en acero ASTM A36 y su peso es semi portable, es decir puede ser cargada por dos personas (mujeres) o una persona (hombre), sus partes son las siguientes:

- Reactor
- Cilindro exterior
- Base

En la base se encuentra la entrada de aire primario, esta entrada debe estar libre de obstáculos los cuales puedan bloquear la entrada del aire.

Tipos de Biomasa que se pueden usar como Combustible

El tipo de biomasa que apropiado para esta estufa es de tipo sólida que se haya originado de poda de árboles o de residuos agroindustriales y con bajo contenido de humedad.

Uso de la Estufa

La biomasa debe ser depositada dentro del reactor de la estufa, por la parte superior de esta, se debe tener en cuenta que la biomasa sea con bajo o nulo contenido de humedad para así lograr una combustión eficiente. Se recomienda utilizar poda de árboles, hojas secas, ramas, etcétera.

Se deberá encender la biomasa con una fuente de calor como fósforos, y se puede ayudar a iniciar la llama con papel o de una pequeña cantidad de combustible de origen fósil.

Pasos para el uso de la estufa



1. Llenar el reactor con biomasa dejando un espacio libre de 4 cm



2. Iniciar la combustión dentro del reactor usando pedazos de pape encendicos o una pequeña cantidad de combustible



3. Esperar a que la combistion se extienda por toda la superciace superior del reactor



4. Colocar la olla con los alimentos sobre la estufa



5. Una vez cocinado que finalizado el uso de la estufa, se deberá esperar un tiempo prudencial par poder manipular la estufa sin riesgo de quemaduras



6. Remover las cenizas del interior del reactor volteando la estufa, a fin de evitar taponamientos por ceniza en los agujeros de la plancha del reactor

Precauciones

La estufa puede generar emisiones nocivas en el inicio de la combustión por lo que se recomienda utilizarla en un lugar abierto o muy bien ventilado.

La estufa puede alcanzar temperaturas que pueden producir quemaduras en caso de un contacto directo.

La estufa no debe ser operada por personas cuya altura no sea mayor a la estufa para evitar volcamiento sobre la misma.

Limpieza y mantenimiento

Una vez que se haya terminado de usar la estufa, se debe esperar un tiempo prudencial en el cual la estufa haya alcanzado una temperatura que al tacto no produzca quemadura y se la pueda manipular.

Para remover la ceniza dentro del reactor se deberá invertir la estufa y puedan caer las cenizas ya sea sobre un contenedor o sobre un depósito de cenizas.

La estufa deberá ser limpiada de residuos de alimentos, grasas, polvo y ceniza para evitar taponamientos en las perforaciones internas de la rejilla.