

DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN PROTOTIPO DE QUEMADOR DE LECHO  
ESTACIONARIO QUE USE COMO COMBUSTIBLE CÁSCARA DE JATROPHA  
CURCA

SERGIO ANTONIO ENRIQUEZ ROSERO  
DANIEL JARAMILLO RESTREPO

UNIVERSIDAD EAFIT  
ESCUELA DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA  
MEDELLÍN  
2012

DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN PROTOTIPO DE QUEMADOR DE LECHO  
ESTACIONARIO QUE USE COMO COMBUSTIBLE CÁSCARA DE JATROPHA  
CURCA

Sergio Antonio Enríquez Rosero  
Daniel Jaramillo Restrepo

Proyecto de grado para optar al título de  
Ingeniero Mecánico

Asesora:  
Carolina Mira Hernández  
Ingeniero Mecánico  
Ingeniero Físico

ESCUELA DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA  
UNIVERSIDAD EAFIT  
MEDELLÍN  
2012

## AGRADECIMIENTOS

A nuestras familias por el apoyo incondicional.

A nuestra asesora Carolina Mira Hernández por su compromiso, paciencia y dedicación.

A nuestros profesores y amigos por sus consejos y apoyo para sacar adelante este proyecto.

“Un sueño no se convierte en realidad a través de la magia, sino a través del sudor, determinación y trabajo duro. Colin Powell

## CONTENIDO

	pág
CONTENIDO	4
LISTA DE ILUSTRACIONES	8
LISTA DE TABLAS	11
INTRODUCCIÓN	12
1 ASPECTOS GENERALES	13
1.1 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	13
1.2 OBJETIVOS	13
1.2.1 Objetivo general	13
1.2.2 Objetivos específicos	13
1.3 JUSTIFICACIÓN	14
2 MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE	15
2.1 JATROPHA CURCA	15
2.2 QUEMADORES	16
3 DETERMINACIÓN DE ALGUNAS PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS DE LA CÁSCARA DE JATROPHA CURCA	22
3.1 PODER CALORÍFICO	22
3.1.1 Objetivo de la prueba	22
3.1.2 Materiales, Equipos y Métodos	22
3.1.3 Resultados y Análisis	23
3.2 GRANULOMETRÍA	24
3.2.1 Objetivo de la prueba	25
3.2.2 Materiales, Equipos y Métodos	25
3.2.3 Resultados y Análisis	28

3.3	PORCENTAJE DE HUMEDAD	29
3.3.1	Objetivo de le prueba	29
3.3.2	Materiales, Equipos y Métodos (Universidad EAFIT)	30
3.3.3	Materiales, Equipos y Métodos (GIEM) de la Universidad De Antioquia	31
3.3.4	Resultados y Análisis	31
3.4	DENSIDAD APARENTE	32
3.4.1	Objetivo de la prueba	32
3.4.2	Materiales, Equipos y Métodos	33
3.4.3	Resultados y análisis	34
3.5	POROSIDAD	35
3.5.1	Objetivo de le prueba	35
3.5.2	Materiales, Equipos y Métodos	36
3.5.3	Resultados y Análisis	36
3.6	ANÁLISIS ELEMENTAL	37
3.6.1	Objetivo de le prueba	37
3.6.2	Método y equipos para determinar el contenido de Nitrógeno.	37
3.6.3	Método y equipos para determinar el contenido de Fósforo.	38
3.6.4	Método y equipos para determinar el contenido de carbono orgánico	38
3.6.5	Resultados y Análisis	39
3.7	CUANTIFICACIÓN DE CENIZAS POR EL MÉTODO DE PÉRDIDAS POR VOLATILIZACIÓN	40
3.7.1	Objetivo de le prueba	40
3.7.2	Materiales, equipos y métodos grupo interdisciplinario de estudios moleculares (GIEM)	40
3.7.3	Resultados y Análisis	41

3.8	IMÁGENES DE MICROSCOPIO DE LA CÁSCARA DE JATROPHA	42
3.8.1	Objetivo de la prueba	42
3.8.2	Materiales, métodos y equipos.	42
3.8.3	Resultados y análisis	43
4	EVALUACIÓN CUALITATIVA DE LAS CONDICIONES DE COMBUSTIÓN DE LA CÁSCARA DE JATROPHA CURCA	45
4.1	ENSAYOS DE COMBUSTIÓN ATMOSFÉRICA	45
4.1.1	Separación de la cáscara y el albumen de Jatropha Curca.	45
4.1.2	Triturado de la cáscara de Jatropha Curca	46
4.1.3	Clasificación de la cáscara de Jatropha Curca	47
4.1.4	Quema atmosférica de la cáscara de Jatropha Curca.	48
4.2	ENSAYO EN UN MODELO DE COMBUSTOR	52
4.2.1	Construcción del combustor.	52
4.2.2	Pruebas de quema de cáscara de Jatropha Curca en el combustor.	54
5	DISEÑO DEL PROTOTIPO QUEMADOR DE LECHO ESTACIONARIO	58
5.1	PLANEAMIENTO DEL PROBLEMA DE DISEÑO	58
5.2	ANÁLISIS FUNCIONAL	58
5.2.1	Caja negra del prototipo de quemador de cáscara de Jatropha Curca.	58
5.2.2	Estructura funcional del prototipo de quemador	59
5.3	MATRIZ MORFOLÓGICA	60
5.4	EVALUACIÓN PREVIA	60
5.5	CONCEPTOS DE SOLUCION	63
5.6	DIMENSIONAMIENTO	64
5.6.1	Cálculo relación aire-combustible	64

5.6.2	Flujo de aire y combustible.	66
5.6.3	Balance de masa para el quemador	66
5.6.4	Balance de energía	68
5.6.5	Área de la parrilla	69
5.7	VOLUMEN DEL HOGAR	70
5.8	CARACTERÍSTICAS DEL DISEÑO	70
6	CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO DE QUEMADAOR	73
6.1	CÁMARA DE COMBUSTIÓN	73
6.2	FONDO	74
6.3	TORNILLO ALIMENTADOR	75
6.4	CAMISA DEL TORNILLO ALIMENTADOR	77
6.5	BUJE DE BRONCE	78
6.6	VENTILADOR	78
6.7	PARRILLA	79
6.8	TOLVA	80
6.9	CHIMENEA	81
7	PRUEBAS BÁSICAS DE OPERACIÓN DEL PROTOTIPO	82
7.1	INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN Y REGISTRO	82
7.2	DESCRIPCIÓN DEL MONTAJE PARA PRUEBAS	83
7.3	RESULTADOS Y ANÁLISIS	85
8	CONCLUSIONES	88
9	RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS	91
	BIBLIOGRAFÍA	93
10	ANEXOS	96

## LISTA DE ILUSTRACIONES

	pág
Ilustración 1. Planta de Jatropha Curca	15
Ilustración 2. Quemadores Sólido - Gas	17
Ilustración 3. Quemador de combustible sólido pulverizado	18
Ilustración 4. Cámara de combustión del quemador	18
Ilustración 5. Quemadores de pulverización mecánica	19
Ilustración 6. Quemadores rotativos de pulverización centrífuga	20
Ilustración 7. Quemadores atmosféricos	20
Ilustración 8. Quemadores de premezcla	21
Ilustración 9. Quemadores mixtos	21
Ilustración 10. Evolución de la temperatura en la prueba de poder calorífico	24
Ilustración 11. Molino de bolas	25
Ilustración 12. Columna de tamices	26
Ilustración 13. Muestra y Juego de tamices	27
Ilustración 14. Tamizador	27
Ilustración 15. Cáscara clasificada	28
Ilustración 16. Clasificación de la cáscara	28
Ilustración 17. Horno de secado	30
Ilustración 18. Medidor de densidad aparente	33
Ilustración 19. Microscopio Carl zeiss 383000051 MWIB	42
Ilustración 20. Borde de la cáscara de Jatropha Curca	43
Ilustración 21. Cara externa de la cáscara	43
Ilustración 22. Cara interna de la cáscara	44
Ilustración 23. Cáscara y Albumen de la Jatropha Curca	45
Ilustración 24. Máquina trituradora de semillas	46
Ilustración 25. Cáscara de Jatropha Curca	46
Ilustración 26. Cáscara de Jatropha Curca partida	47



Ilustración 27. Tamaños de grano	47
Ilustración 28. Elemento utilizados para la quema de la muestra	49
Ilustración 29. Quema atmosférica de cáscara de Jatropha Curca	50
Ilustración 30. Construcción del combustor	53
Ilustración 31. Partes del combustor	53
Ilustración 32. Combustor de pruebas	54
Ilustración 33. Precalentado del sistema	54
Ilustración 34. Elementos utilizados prueba de quema en el combustor	55
Ilustración 35. Quema de cáscara en la cámara de combustión	56
Ilustración 36. Quema de cáscara en el borde del ducto	56
Ilustración 37. Alimentador del combustor	57
Ilustración 38. Caja negra del quemador	59
Ilustración 39. Síntesis funcional de un prototipo de quemador	59
Ilustración 40. Esquema de flujos másicos en el prototipo de quemador	67
Ilustración 41. Esquema de flujos de energía	68
Ilustración 42. Cámara de combustión	74
Ilustración 43. Cámara recubierta con el aislante	74
Ilustración 44. Fondo del quemador	75
Ilustración 45. Molino corona	75
Ilustración 46. Tornillo alimentador	76
Ilustración 47. Sistema de alimentación	76
Ilustración 48. Camisa del tornillo alimentador	77
Ilustración 49. Camisa del tornillo y tolva alimentadora	77
Ilustración 50. Buje de cobre	78
Ilustración 51. Sistema de ventilación	79
Ilustración 52. Lamina en la cortadora laser	79
Ilustración 53. Parrilla en el sistema	80
Ilustración 54. Tolva alimentadora	80
Ilustración 55. Chimenea del quemador	81
Ilustración 56. Conjunto de piezas del quemador	81

Ilustración 57. Sistema de sujeción	83
Ilustración 58. Ubicación de termopares	83
Ilustración 59. Inicio de llama	84
Ilustración 60. Ensamble final del sistema	85
Ilustración 61. Cenizas del sistema	87
Ilustración 62. Cenizas en el sistema	87

## LISTA DE TABLAS

	pág
Tabla 1. Resultados prueba de Poder calorífico	24
Tabla 2. Tabla de tamices	26
Tabla 3. Porcentajes de tamaño de grano	29
Tabla 4. Resultado Universidad EAFIT	31
Tabla 5. Resultados grupo GIEM	32
Tabla 6. Resultados densidades obtenidas	34
Tabla 7. Densidad aparente en maderas	35
Tabla 8. Resultados análisis de porosidad	36
Tabla 9. Resultados Análisis Elemental	39
Tabla 10. Resultados porcentaje de cenizas GIEM	41
Tabla 11. Porcentajes de cenizas para unas especies de pino	41
Tabla 12. Cantidades de cada tamaño de la muestra	48
Tabla 13. Condiciones de calentamiento resistencia eléctrica	49
Tabla 14. Resultados quema atmosférica de cáscara	51
Tabla 15. Matriz morfológica para un prototipo de quemador	60
Tabla 16. Criterios de evaluación para las soluciones	61
Tabla 17. Evaluación de los principios de solución	62
Tabla 18. Concepto de solución 1	63
Tabla 19. Concepto de solución 2	63
Tabla 20. Fracciones másicas de los elementos en la cáscara	64
Tabla 21. Fracciones moleculares de los elementos en la cáscara	65
Tabla 22. Principales características del prototipo del quemador	70
Tabla 23. Datos de la quema de cáscara en el prototipo de quemador	86
Tabla 24. Máximas temperaturas alcanzadas por el sistema	86

## INTRODUCCIÓN

En la actualidad el consumo de combustibles fósiles en procesos industriales y cotidianos, como el demandado en las ciudades por el parque automotriz y sus grandes fábricas, representa un alto porcentaje en la contaminación atmosférica mundial por emisiones de gases efecto invernadero (GEI). Su condición de recurso finito, no renovable y agente altamente contaminante han sido factores determinantes en la búsqueda y estudio de nuevos recursos que suplan las necesidades energéticas actuales, y sean a la vez una alternativa viable al agotamiento ya sensible de energías fósiles como el gas, el petróleo y el carbón. Estas tecnologías no convencionales pueden ser más limpias y rentables, y ayudar a frenar el deterioro del ambiente. (Campuzano, 2009)

Los nuevos desarrollos en tecnología agro-energética tienen ventajas no solo a nivel ambiental sino también a nivel económico en los países donde se producen biocombustibles. Se impacta de manera positiva la economía, al generar un aumento en la tasa de empleo, crecimiento del desarrollo agrícola y reducción de importación de hidrocarburos, lo que sustenta la viabilidad de una política nacional por el interés en el desarrollo de biocombustibles. (Redalyc, 2009)

Este proyecto muestra cómo se diseñó y se construyó un prototipo de quemador de lecho estacionario, el cual utiliza como combustible la cáscara de *Jatropha Curca*, la cual es un subproducto en el proceso de extracción de aceite vegetal, por lo cual el presente proyecto pretende dar un valor agregado a este material que es considerado un desperdicio. Para el desarrollo de este prototipo se requiere un estudio de caracterización de la *Jatropha Curca*, el cual servirá para establecer las condiciones requeridas para una combustión apropiada de la cáscara.

## 1 ASPECTOS GENERALES

### 1.1 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

El problema del presente proyecto es diseñar y construir un prototipo de quemador para caldera, que utilice como combustible la cáscara de *Jatropha Curca*, la cual es considerada como desperdicio en el proceso de generación de Biocombustible que se obtiene del albumen de esta semilla.

### 1.2 OBJETIVOS

#### 1.2.1 Objetivo general

Diseñar y construir un prototipo de quemador que use como combustible cáscara de *Jatropha Curca*, como alternativa para dar valor agregado a los subproductos del proceso de extracción de aceite vegetal, considerando las propiedades y condiciones de combustión en lecho estacionario.

#### 1.2.2 Objetivos específicos

- Determinar algunas propiedades de la cáscara de *Jatropha Curca*, como son: Poder calorífico, densidad, composición química, entre otras.
- Implementar y realizar ensayos de laboratorio para determinar condiciones de combustión de la cáscara de *Jatropha Curca* en lecho estacionario.
- Elaborar un diseño para un prototipo quemador en lecho estacionario para la cáscara de *Jatropha Curca*.
- Construir el prototipo de quemador diseñado.
- Realizar pruebas básicas de operación del quemador diseñado.

### 1.3 JUSTIFICACIÓN

La situación actual de crisis energética y ambiental, genera grandes preocupaciones y demanda soluciones urgentes que ayuden a mitigar o disminuir el deterioro del ambiente y nuevas estrategias para responder a la escasez de los combustibles fósiles. El consumo de energía en el mundo ha aumentado significativamente desde 1992, y se predice un crecimiento del orden del 2% en el 2020. El mayor aumento de consumo de energía obtenida de combustibles fósiles, petróleo en este caso, se registra en el sector del transporte, marcado por un 95%, y se estima que el índice de aumento será del 1.5% por año en los países desarrollados y del 3.6% en países en vía de desarrollo.(un, 2002)

El 75% de las emisiones de gas de efecto invernadero son producidas por las actividades de quema de combustibles fósiles. De otro lado las energías “limpias”, como: energía hidroeléctrica, la geotérmica, la eólica, solar, y la obtenida de la biomasa; representan aproximadamente tan solo el 4,5% del total de la producción de energía. Por todas estas razones, resulta pertinente realizar estudios en pro de búsqueda de nuevos combustibles que suplan las necesidades energéticas actuales, que sean sostenibles a través del tiempo, renovables y con bajo impacto ambiental. (Cumbre de Johannesburgo, 2002)

El desarrollo de este proyecto exige conocimientos y habilidades adquiridas durante el pregrado de ingeniería mecánica en asignaturas como: diseño de máquinas, ciencia de los materiales, termodinámica, y transferencia de calor. Este proyecto le apunta a la sostenibilidad de la producción de biocombustibles como fuente generadora de energía limpia y renovable.

## 2 MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE

Un quemador es un dispositivo que se utiliza para generar calor, a partir de la quema de combustibles líquidos, gaseosos y en algunos casos sólidos. Los quemadores son usados en calderas, calentadores de agua y climatizadores de ambiente, estos también son utilizados en procesos industriales para calentar sustancias y generar energía. En esta sección se presentan algunas generalidades de la *Jatropha* y distintos tipos de quemadores, con sus respectivos combustibles para trabajar, como por ejemplo los combustibles sólidos.

### 2.1 JATROPHA CURCA

La *Jatropha Curca* es Nativa de América Central, fue difundida por Asia y África por comerciantes portugueses, como planta para cercar y hoy en día se ha expandido por el mundo entero. Esta es una planta oleaginosa no alimentaría, de cuyas semillas, que son tóxicas, se extrae el aceite con el cual se puede fabricar biodiesel. La *Jatropha Curca* tiene aspecto de un árbol pequeño como se muestra en la Ilustración. (Universidad Nacional Autónoma de México., 2008)

Ilustración 1. Planta de *Jatropha Curca*



(Universidad Nacional Autónoma de México., 2008)

Esta planta resiste altas temperaturas y sequías, al tiempo que protege y fertiliza el suelo. Necesita poca agua para crecer aunque tiene un mejor desempeño si recibe aguas lluvias y es tratada con fertilizantes. Empieza a producir de manera rentable al cabo de un año de sembrado, su producción se incrementa año tras año durante los primeros 4 años y a partir de ahí se estabiliza en los 40 – 50 años que le quedan de vida. El aceite producido a partir de la semilla de la *Jatropha Curcas* es semejante al diesel obtenido del petróleo. La semilla genera un rendimiento de aceite entre el 30 y 40%. (Universidad Nacional Autónoma de México, 2008)

## 2.2 QUEMADORES

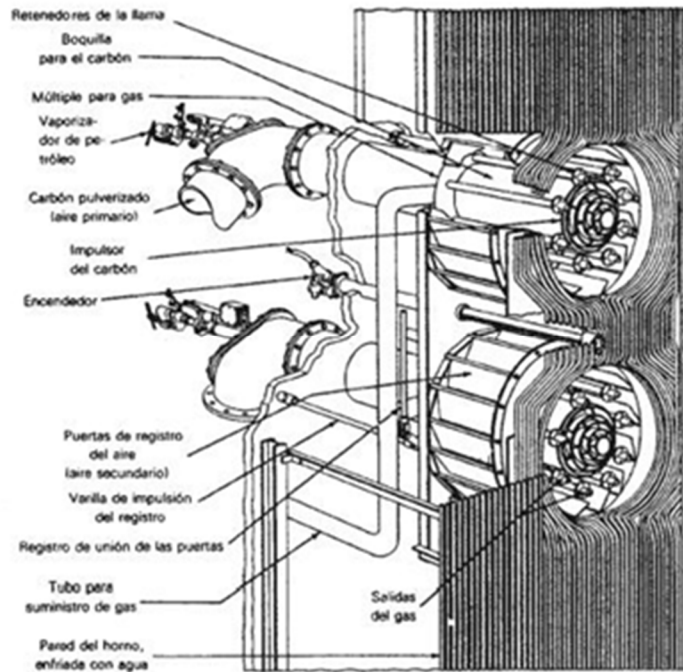
La expresión quemador hace referencia a un dispositivo para quemar combustible, este puede ser líquido, gaseoso o sólido. La principal función de este dispositivo es generar calor, generalmente lo hace mediante una llama. Un quemador normalmente va asociado a una caldera o a un generador de calor.(Scribd Clasificación de los quemadores.)

La siguiente clasificación se realizará según el tipo de combustible a utilizar:

- ✓ Quemadores para combustibles sólidos.  
En este tipo de quemador, el carbón pulverizado es halado por aire caliente hasta el quemador. Este aire se le conoce como Aire primario, este tipo de quemadores se instalan de tal manera que el carbón y el aire primario generen un movimiento tipo tornillo y con esto garantizar que se renueve el aire que pasa a través del carbón y la combustión se haga de forma normal. (Directorios Industriales)



## Ilustración 2. Quemadores Sólido - Gas



(Directorios Industriales)

Otro tipo de quemadores de combustibles sólidos son los quemadores flexiflametm estos poseen tecnología más avanzada desarrollada para hornos rotatorios en la combustión de combustible pulverizado. Estos utilizan tres corrientes de aire de moldeado, dos de las corrientes de aire giran para envolver el flujo de inyección de combustible sólido, y así mediante procedimientos sencillos optimizar la combustión compleja del combustible y así mantener un gran control sobre las emisiones de dióxido de carbono.

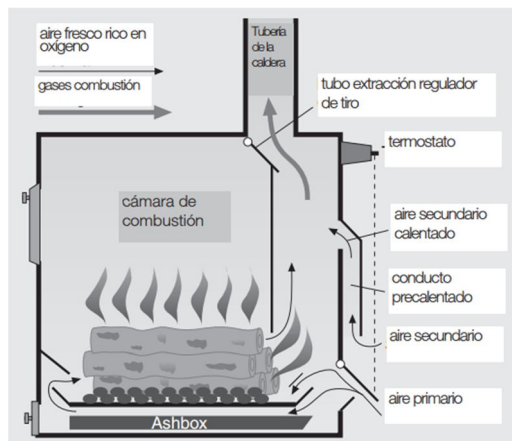
Ilustración 3. Quemador de combustible sólido pulverizado



(directindustry, 2012)

En las plantas de producción con calderas de combustibles sólidos, se diferencian los quemadores entre los que queman madera, y los de carbón. Las calderas que utilizan combustibles sólidos, el 80% del aire de combustión se utiliza para el proceso de la combustión. Y el 20% faltante alimenta a los gases residuales que se producen durante la combustión, garantizando una combustión completa.

Ilustración 4. Cámara de combustión del quemador

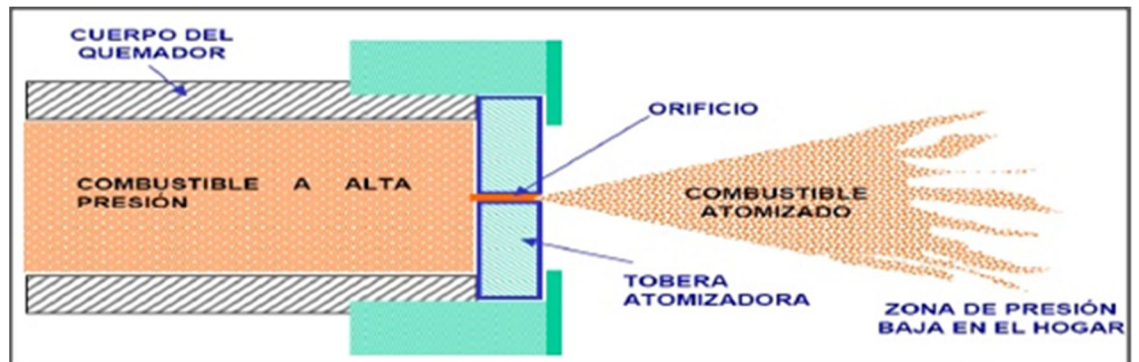


(Testo, 2004)

✓ Quemadores de Pulverización Mecánica

Este tipo de quemadores son los más utilizados en la industria, ya que para que se dé la pulverización, el combustible utilizado debe ser de baja viscosidad. En estos quemadores la pulverización se realiza a través de una tobera donde llega el combustible a presión impulsado por una bomba. (Scribd Quemadores de pulverización mecánica)

Ilustración 5. Quemadores de pulverización mecánica

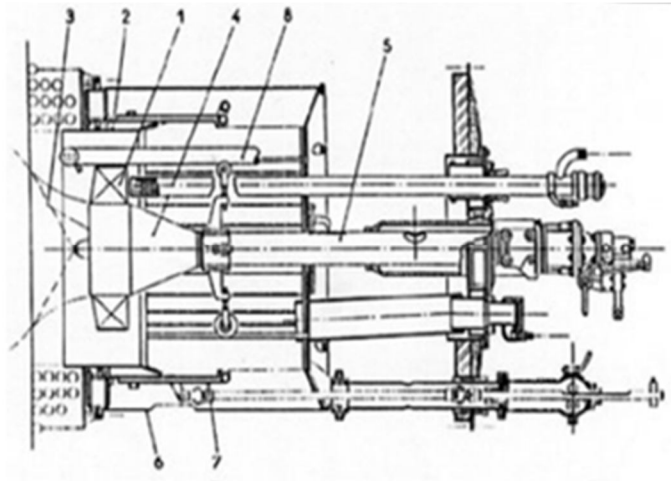


(Scribd Clasificación de los quemadores.)

✓ Quemadores rotativos de pulverización centrífuga

En este tipo de quemadores la pulverización se logra por medio de la acción centrífuga que se genera sobre el combustible, este elemento puede ser una copa que gira a gran velocidad. (Oficios Técnicos, 2012)

Ilustración 6. Quemadores rotativos de pulverización centrífuga



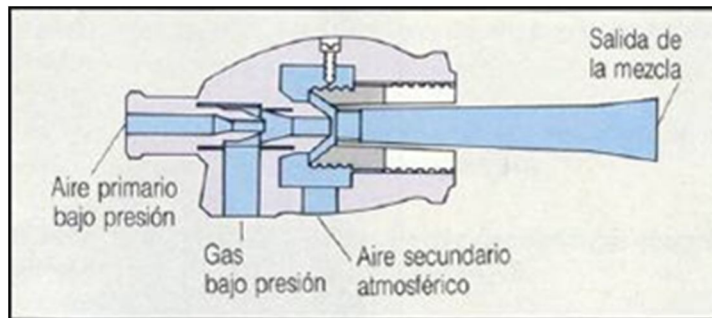
- 1. Roseta de palas curvilíneas
- 2. Director de aire cilíndrico
- 3. Núcleo de fijación de llama
- 4. Cono deflector
- 5. Jacket-tube central
- 6. Virola perforada de equilibrado estático
- 7. Virola móvil de equilibrado
- 8. Lanzas para gas (equipos en la versión gas o mixta F.O./gas)

(Oficios Técnicos, 2012)

✓ Quemadores atmosféricos

En este tipo de quemadores la combustión se hace en una zona con presión atmosférica. (Scribd Quemadores atmosfericos, 1997)

Ilustración 7. Quemadores atmosféricos

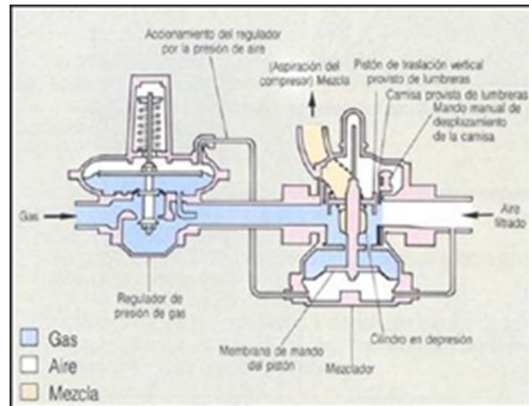


(Sermate)

✓ Quemadores de remezcla

En estos quemadores el aire se mezcla con el combustible gaseoso antes de entrar al quemador. (Scribd Clasificación de los quemadores.)

Ilustración 8. Quemadores de premezcla

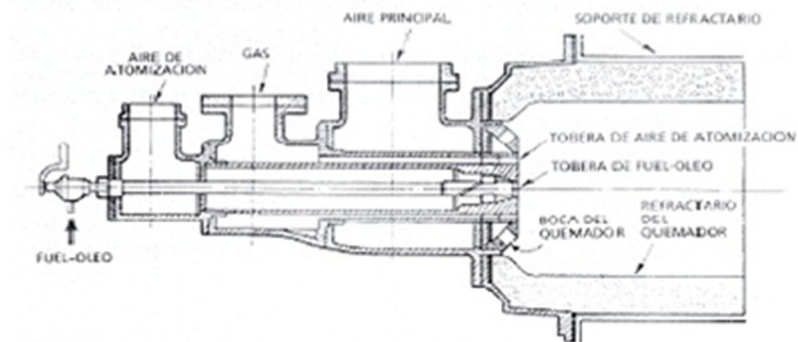


(Sermate)

✓ Quemadores mixtos.

Este tipo de quemadores se utilizan en calderas grandes y sirven para garantizar que el servicio se preste de manera continua, este tipo de caldera puede trabajar por separado con más de un combustible. (Scribd Clasificación de los quemadores.)

Ilustración 9. Quemadores mixtos



(Scribd Clasificación de los quemadores.)

### 3 DETERMINACIÓN DE ALGUNAS PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS DE LA CÁSCARA DE JATROPHA CURCA

Actualmente, por la situación de crisis energética mundial, producto de la demanda y la escases de recursos fósiles para el procesamiento de combustibles, es necesario optar por nuevos recursos que sean de fácil acceso y más amigables con el medio ambiente. En este capítulo se muestran las pruebas de caracterización que se realizaron para la cáscara de Jatropha Curca y se muestran los resultados obtenidos. También se enuncian los métodos por medio de los cuales se establecen los resultados, y posteriormente se analizan.

#### 3.1 PODER CALORÍFICO

Es la propiedad más importante en el momento de selección y utilización de un combustible, ya que se define la cantidad de energía que produce o libera cuando se realiza una combustión completa (Cengel & Boles, 2009)

##### 3.1.1 Objetivo de la prueba

Determinar el valor calorífico de la cáscara de Jatropha Curca para determinar su potencial energético como combustible.

##### 3.1.2 Materiales, Equipos y Métodos

Para realizar esta prueba se utiliza una bomba calorimétrica PARR 1341EB, un termómetro de alta sensibilidad, cronómetro, además se requieren los siguientes materiales:

- ✓ Alambre de Ignición (1400 cal/g)
- ✓ Pinzas
- ✓ Oxígeno
- ✓ Agua destilada
- ✓ Cáscara de Jatropha

La muestra de combustible de 1g se ubica en el crisol, y este se pone en el respectivo soporte en la tapa de la cápsula de combustión. Se conecta un alambre fusible entre los electrodos ubicados en la tapa de manera que esté en contacto con la muestra. Se cierra la cápsula de combustión y se carga con oxígeno a 28 atm de presión. Cuando pasa una corriente eléctrica por el alambre, el combustible (Jatropha Curca) se enciende generando la combustión completa. La cápsula en que ocurre la combustión se sumerge en agua destilada, la cual absorbe la energía liberada en la combustión. La bomba calorimétrica tiene también una camisa exterior de aislamiento para minimizar las pérdidas de calor al ambiente.

Cuando el montaje está completo se inicia el cronómetro, se toma el dato de la temperatura del agua y se prende el rotor que homogeniza la temperatura del agua. Se toman datos cada minuto hasta el minuto 5, en ese momento se realiza la ignición. Luego de la ignición la temperatura empieza a incrementar notoriamente y se registra su valor cada 15 segundos hasta que se estabiliza.

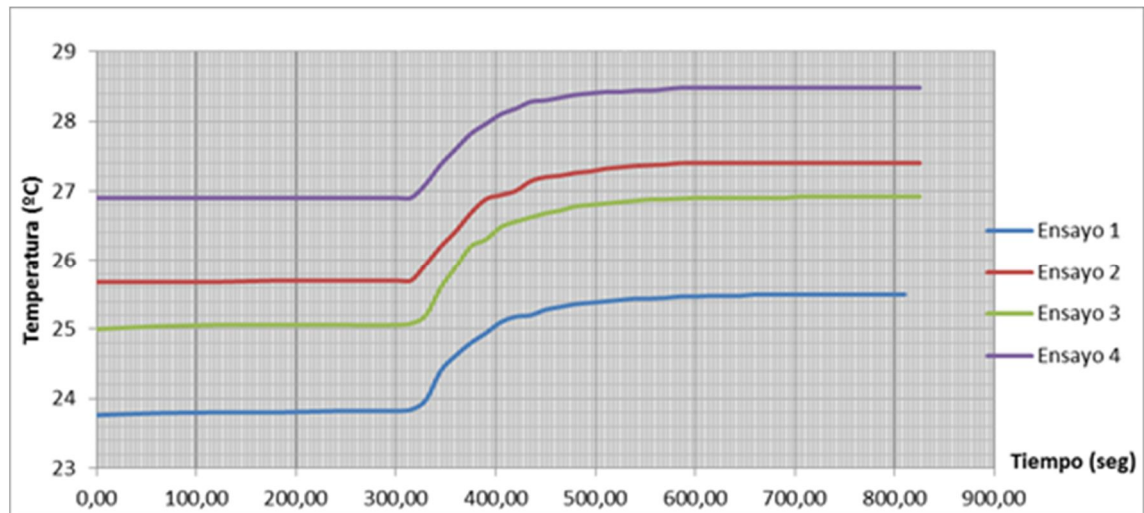
Luego de tener 10 datos iguales de temperatura, aproximadamente a los 13 minutos, se apaga el rotor, y se realiza el desmontaje. Se mide el alambre (fusible) que queda de la combustión. Se registran todos los datos y se prosigue con el cálculo del poder calorífico. La prueba de poder calorífico se realiza a cuatro muestras.

### 3.1.3 Resultados y Análisis

En la Ilustración 10, se muestra el comportamiento de la temperatura durante la prueba de poder calorífico para las cuatro muestras. Por ejemplo, para el ensayo 1 ocurre que a los 320 segundos de iniciada la prueba la temperatura empieza a incrementar hasta los 25.5°C, esto ocurre durante aproximadamente 280 segundos, luego el sistema se estabiliza.

Los tres ensayos siguientes tienen el mismo comportamiento, la diferencia que se observa es que la temperatura del agua destilada aumenta después de cada ensayo.

Ilustración 10. Evolución de la temperatura en la prueba de poder calorífico



En la Tabla 1 se presentan los resultados obtenidos en la prueba de poder calorífico de la cáscara de *Jatropha Curca*. El valor promedio del poder calorífico es 17298 kJ/kg, el cual es un valor alto de poder calorífico para un caso de biomasa.

Tabla 1. Resultados prueba de Poder calorífico

ENSAYO	VALOR PROMEDIO	DESVIACIÓN ESTÁNDAR
Poder calorífico (kJ/kg)	17298	1405

### 3.2 GRANULOMETRÍA

Esta prueba consiste en obtener distintos tamaños de una muestra, la cual hace parte del objeto de estudio, esto por medio de la trituración y luego la separación de diferentes tamaños de grano. (unilibresoc)



### 3.2.1 Objetivo de la prueba

Determinar el tamaño de grano que presente un mejor comportamiento para la combustión.

### 3.2.2 Materiales, Equipos y Métodos

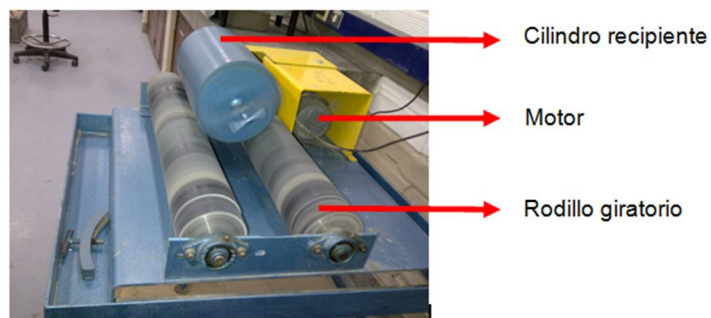
Para realizar este ensayo se utiliza la muestra de cáscara de *Jatropha Curca* al igual que los siguientes equipos:

- ✓ Molino de bolas
- ✓ Juego de tamices
- ✓ Tamizador

La trituración de la cáscara de *Jatropha* se realiza en el molino de bolas del laboratorio de suelos de la universidad EAFIT. Este procedimiento se realiza con el fin de obtener distintos tamaños de la cáscara, para luego ser clasificarlos y hacer ensayos de quema en el prototipo a construir, y así evaluar el comportamiento de la combustión de la cáscara según su tamaño de grano.

El molino de bolas consta de dos rodillos, de los cuales uno de estos está conectado mecánicamente a un motor que lo hace girar, sobre estos rodillos se apoya un cilindro donde se introduce la cáscara de *Jatropha* y los balines de hierro que al girar fracturan la cáscara. En la Ilustración 11 se observa el montaje del molino de bolas.

Ilustración 11. Molino de bolas



Luego de triturar la cáscara se la clasifica según el tamaño de grano. Para la separación de la cáscara se utiliza una columna de 4 tamices como se ve en Ilustración 12, de la misma manera, el tamaño de malla se muestra en la Tabla 2.

Ilustración 12. Columna de tamices



Tabla 2. Tabla de tamices

DESCRIPCION	NUMERO	LUZ (mm)	TAMAÑO DE GRANO
Tamices Norma ASTM E - 11/95	1/4"	6.30	Grande
Tamices Norma ASTM E - 11/95	4	4.75	Mediano
Tamices Norma ASTM E - 11/95	8	2.36	Pequeño
Tamices Norma ASTM E - 11/95	16	1.18	Pulverizado

Este procedimiento consiste en armar una torre de tamices con un fondo y ubicarlo en un tamizador, el cual al vibrar hace que las partículas se filtren por las mallas de los tamices, y así ser clasificados según su tamaño.

En la Ilustración 13 se observa la muestra en la torre de tamices para luego ser ubicada en el tamizador

Ilustración 13. Muestra y Juego de tamices



En la Ilustración 14 se observa el montaje de la columna de tamices y tamizador, el cual se pone en movimiento y por acción de la vibración, hace pasar la muestra por cada uno de las mallas de la columna de tamices, este proceso dura alrededor de 2 minutos.

Ilustración 14. Tamizador



Terminado el proceso enunciado anteriormente, se realiza el desmontaje del sistema y se obtienen los diferentes tamaños de cáscara de *Jatropha Curca* como se muestra en la Ilustración 15.

Ilustración 15. Cáscara clasificada



### 3.2.3 Resultados y Análisis

El peso total de la muestra que se ubica en el montaje es de 2400g, teniendo ya la clasificación de la muestra, se pesa cada uno de los tamaños, esto con el fin de obtener el peso que se tiene de cada tamaño de muestra luego del procedimiento de tamizado.

En la Ilustración 16 se observa los cuatro (4) tamaños de muestra obtenidos .

Ilustración 16. Clasificación de la cáscara

<b>Grande</b>	<b>Mediano</b>	<b>Pequeño</b>	<b>Pulverizado</b>
			

En la Tabla 3 se muestran los distintos porcentajes obtenidos luego de realizar el tamizado, esto esta relacionado con el tiempo que se mantiene la muestra en el molino de bolas, para este caso se observa el mayor porcentaje en el tamaño de muestra pequeño con casi el 47%.

Tabla 3. Porcentajes de tamaño de grano

TAMAÑO DE GRANO	PORCENTAJE (%)
Grande	9.06
Mediano	18.26
Pequeño	46.47
Pulverizado	26.21
TOTAL	100

### 3.3 PORCENTAJE DE HUMEDAD

Este es un ensayo se realiza con el fin de determinar la cantidad de humedad presente en una muestra. (slideshare, 2012)

#### 3.3.1 Objetivo de le prueba

Es importante conocer el porcentaje de humedad, ya que es determinante a la hora de permitir una combustión exitosa. Tiene efectos importantes en la combustión, como:

- ✓ Dificulta el proceso de molienda al presentar compactaciones y saturación.
- ✓ Aumento en el gasto energético para el secado del combustible.
- ✓ Disminución en el proceso de la combustión.

(Subero Pérez, 2010)

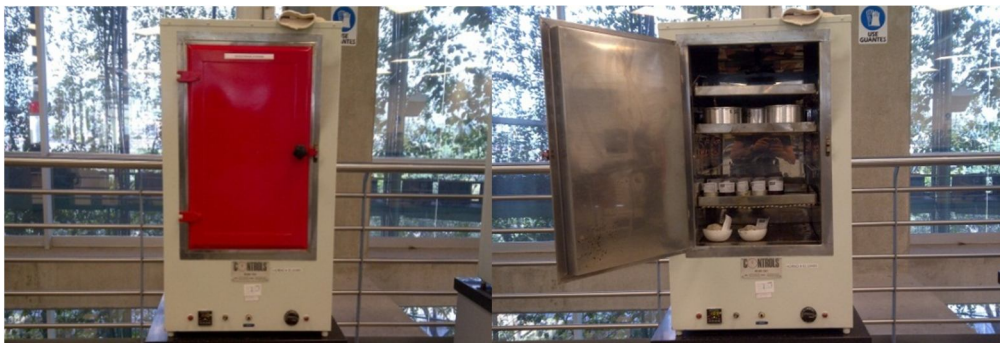
Esta prueba se realiza en dos sitios, en el ítem 3.3.2 se muestran los materiales, equipos y método de la prueba realizada en el laboratorio de suelos de la Universidad EAFIT, y en el ítem 3.3.3 se muestran los materiales, equipos y método de la prueba realizada por el grupo interdisciplinario de estudios moleculares (GIEM) de la Universidad De Antioquia, esta prueba se realiza bajo la norma NTC 5167 (ICONTEC, 2004).

### 3.3.2 Materiales, Equipos y Métodos (Universidad EAFIT)

- ✓ Balanza
- ✓ Recipiente
- ✓ Horno Controls D1401/AZ
- ✓ Cáscara de Jatropha Curca

El porcentaje de humedad presente en la cáscara de Jatropha Curca se determina de la siguiente manera. Se utiliza la balanza para determinar el peso inicial de muestra, luego se vierte el contenido en el recipiente y es llevado al horno, después en el horno se fija una temperatura de 60°C, la cual permanece constante durante 24 horas, tiempo en el cual la muestra permanece dentro del horno. Cumplido el tiempo estipulado, se retira la muestra del horno y se lleva a la balanza, donde se obtiene el peso final. En la Ilustración 17 se muestra el horno utilizado en este procedimiento.

Ilustración 17. Horno de secado



### 3.3.3 Materiales, Equipos y Métodos (GIEM) de la Universidad De Antioquia

- ✓ Estufa de secado
- ✓ Molino
- ✓ Tamiz No. 35 ASTM (0,5 mm)
- ✓ Cuarteador
- ✓ Recipientes para secado en estufa de aproximadamente 400 ml
- ✓ Balanza (con precisión de 0,01 g)
- ✓ Desecador

Inicialmente se cuartea la muestra original, se pesa el recipiente vacío en el cual se cuantificará la humedad, se pesa en el recipiente una cantidad de muestra suficiente como para recolectar 300 g de material seco. (Si es necesario se coloca la misma muestra en dos recipientes).

Luego se lleva el recipiente a la estufa de secado y se mantiene a 60 °C durante 24 horas. Pasadas las 24 horas se saca de la estufa, se deja enfriar dentro de un desecador hasta peso constante y se pesa. Se muele el material en el molino y posteriormente tamizado (tamiz No. 35 ASTM (05, mm)), y finalmente se empaca la muestra en recipientes debidamente rotulados.

### 3.3.4 Resultados y Análisis

En la Tabla 4 se observa los resultados obtenidos de la prueba para determinar el porcentaje de humedad realizado en la Universidad EAFIT.

Tabla 4. Resultado Universidad EAFIT

PESO INICIAL DE LA MUESTRA (g)	PESO FINAL DE LA MUESTRA (g)	PORCENTAJE DE HUMEDAD (%)
46.70	42.46	9.98

En la Tabla 5 se muestran los resultados del análisis realizado por el grupo GIEM.

Tabla 5. Resultados grupo GIEM

PARÁMETRO	TÉCNICA	NORMA	RESULTADO (%)
Humedad	Gravimétrica	NTC 5167	9.14
Humedad	Gravimétrica	NTC 5167	9.21

Comparando los resultados de las 2 tablas de datos anteriores, se observa que son muy similares. Se debe tener en cuenta que el porcentaje de humedad está relacionado con la temperatura y la humedad del aire ambiente en el que se encuentra almacenada la cáscara.

Si se compara este porcentaje de humedad de la cáscara de *Jatropha Curca* con el porcentaje de humedad de la madera es bajo, ya que el porcentaje de humedad de la madera puede ser de hasta un 20% a una temperatura de 27°C, la cual es la temperatura promedio en Medellín-Colombia. (acaceres)

### 3.4 DENSIDAD APARENTE

La densidad aparente es la relación entre el volumen y el peso seco de un material, a esta relación la afecta directamente la composición y la estructura, en una determinada combustión puede incidir de una u otra manera. Un combustible con alta densidad aparente ocupa menos volumen y es más pesado, por lo que permite una duración más larga de la combustión. (construmatica)

#### 3.4.1 Objetivo de la prueba

Determinar la densidad aparente de la cáscara de *Jatropha Curca*, ya que conociendo esta magnitud se pueden definir algunas dificultades que no permiten el desarrollo de una combustión efectiva. De igual manera establecer condiciones



que propicien una buena combustión, como disminuir, o dejar el tamaño de grano original, para jugar con el grado de compactación.

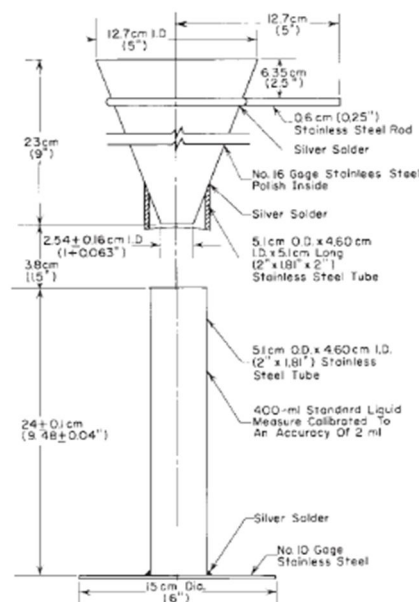
### 3.4.2 Materiales, Equipos y Métodos

Para realizar este procedimiento se utiliza la muestra de cáscara de *Jatropha Curca*, además de los siguientes equipos:

- ✓ Balanza digital
- ✓ Medidor de densidad aparente
- ✓ Regla

Se utiliza un dispositivo para la medición de densidad aparente de acuerdo con la norma colombiana NTC 955. Entonces se ensambla el medidor de densidad aparente como se muestra en la Ilustración 18, se obstruye el final del embudo con la mano o con un plano apropiado y se vierte la muestra de cáscara de *Jatropha*. La distancia del final del embudo al cilindro recipiente es de 38mm, este recipiente tiene una masa de 896,2g. Luego se deja que la muestra fluya hacia el recipiente.

Ilustración 18. Medidor de densidad aparente



(ICONTEC, 1996)



Cuando el material llena el cilindro inferior el cual tiene un volumen de 400ml, con una espátula se elimina el material sobrante, se pesa en la balanza digital y con la masa final se calcula el peso en gramos de  $1\text{cm}^3$  de material, es decir la densidad aparente.

### 3.4.3 Resultados y análisis

En la Tabla 6 se muestran los resultados que se obtienen después del procedimiento descrito anteriormente, se observa, como se esperaba, que la muestra de grano pequeño de *Jatropha Curca* es la que posee mayor densidad aparente.

Tabla 6. Resultados densidades obtenidas

TAMAÑO DE GRANO	PESO (CILINDRO + CÁSCARA) (g)	DENSIDAD APARENTE (g/ml)
Grande	982,9	0,2167
Mediano	1017,3	0,3027
Pequeño	1042,5	0,3657

Al comparar los resultados de densidad aparente de la cáscara de *Jatropha Curca* con la densidad aparente de algunas maderas, se encuentra que posee una densidad aparente muy parecida a la madera pinabette la cual está entre 0.37-0.75 g/ml. En la Tabla 7, se muestran las densidades aparentes de las maderas más comunes, las maderas se clasifican según su densidad aparente. Se consideran maderas pesadas si tienen densidad aparente superior a 0.8, ligeras si están entre 0.5-0.7 y muy ligeras menores a 0.5.

Tabla 7. Densidad aparente en maderas

TIPO DE MADERA	DENSIDAD APARENTE (g/ml)
Pino Común	0.32 – 0.76
Pino Negro	0.38 – 0.74
Pino- tea	0.83 – 0.85
Albeto	0.32 – 0.62
Pinabette	0.37 – 0.75
Alerce	0.44 – 0.80
Roble	0.71 – 1.07
Encina	0.95 – 1.20
Haya	0.60 – 0.90
Álamo	0.45 – 0.70
Olmo	0.56 – 0.82
Nogal	0.60 – 0.81

(ucn, 2010)

### 3.5 POROSIDAD

La porosidad es un factor que afecta directamente en el proceso de combustión, ya que el tamaño y distribución de los poros en un combustible sólido puede incidir en la retención de humedad en un eventual desplazamiento o almacenamiento. (lacomunidadpetrolera, 2012)

#### 3.5.1 Objetivo de la prueba

Determinar la porosidad de la cáscara de *Jatropha Curca*, ya que a mayor tamaño del poro el oxígeno puede ingresar más fácil y lograr obtener una mejor combustión. Sin embargo, como se mencionó anteriormente una alta porosidad también puede favorecer una mayor absorción de humedad. Igualmente la alta porosidad reduce la densidad de empaquetamiento o densidad aparente.

### 3.5.2 Materiales, Equipos y Métodos

- ✓ Analizador Acelerado de Área Superficial y Porosimetría (ASAP 2020) micromeritics.
- ✓ Balanza Analítica OHAUS Explorer.

Se realiza la prueba utilizando el método volumétrico, este ensayo utiliza Nitrógeno grado 5, la muestra se somete a una temperatura de  $-197.8^{\circ}\text{C}$ . Este método consiste en saturar la muestra y posteriormente medir su volumen por inmersión, luego de esto se tritura la muestra y se halla el volumen, luego el cociente entre esos dos valores proporciona el valor de porosidad. (Ayala carcedo, 2006)

### 3.5.3 Resultados y Análisis

En la Tabla 8 se muestra el resultado obtenido después de la prueba de porcentaje de porosidad realizado por el Grupo de Ciencia de los Materiales de la Universidad de Antioquia.

Tabla 8. Resultados análisis de porosidad

MASA DE LA MUESTRA (g)	ÁREA SUPERFICIAL BET ( $\text{m}^2/\text{g}$ )	COEFICIENTE DE CORRELACIÓN	POROSIDAD
2.3597	$0.2541 \pm 0.0232$	0.9862	0.8946

Se observa que la muestra posee una porosidad de 89%, el cual es un valor alto y explica, en parte, la baja densidad aparente. Es probable, que la cáscara se consuma rápidamente en el proceso de combustión.

### 3.6 ANÁLISIS ELEMENTAL

Este es un tipo de ensayo en el cual se obtiene la composición química y contenido de cada uno de los elementos que compone la muestra analizada. (geocities)

#### 3.6.1 Objetivo de la prueba

Determinar la composición química de la cáscara de *Jatropha Curca*, para establecer algunas relaciones estequiométricas de la combustión

#### 3.6.2 Método y equipos para determinar el contenido de Nitrógeno.

- ✓ Equipo con sistema de recolección de gases (Digestor y Scruber).
- ✓ Equipo de destilación con flujo de vapor.
- ✓ Equipo titulador.
- ✓ Potenciómetro.
- ✓ Erlenmeyers de 250ml
- ✓ Vasos de precipitado.
- ✓ Tubos de ensayo para nitrógeno (para digestor y destilador).

(Grisales, Ortega, Blanco, & Rodríguez, 2012)

El método que se utiliza para realizar este análisis es el método Macro-Kjeldahl, el cual está constituido por tres pasos:

1. Digestión de la muestra en ácido sulfúrico con un catalizador, hasta convertir todo el nitrógeno a la forma amoniacal.
2. Destilación del sulfato amónico en una solución atrapadora.
3. cuantificación del amoníaco por valoración con una solución estándar.

(González-Mena, Reimers-Reyes, & Pérez-Bejarano, 2010)

### 3.6.3 Método y equipos para determinar el contenido de Fósforo.

- ✓ Fotómetro: Espectrofotómetro.
- ✓ Bomba de vacío.
- ✓ Balanza Analítica.
- ✓ Pipeta automática de 10ml.
- ✓ Balones volumétricos de 100ml.
- ✓ Pipetas automáticas de 200 $\mu$ L y 1000 $\mu$ l.
- ✓ Campana de extracción.
- ✓ Agitador magnético.
- ✓ Vaso de precipitados
- ✓ Barras agitadoras.
- ✓ Perlas de vidrio.
- ✓ Erlenmeyers.

Este es un método de reducción con cloruro estagnoso. El fosfato reacciona con el molibdato amónico y luego es reducido por el cloruro estagnoso para formar un complejo azul. Los resultados se expresan en (mg/l) de fósforo.

### 3.6.4 Método y equipos para determinar el contenido de carbono orgánico

- ✓ Balanza analítica
- ✓ Erlenmeyer de 250 ml
- ✓ Bureta de 50 ml
- ✓ Pipetas aforadas de 20 ml y 10 ml

Para determinar el contenido de carbono orgánico se utiliza el método Walkley-Black, el cual se fundamenta en el ataque al carbono presente en la materia orgánica, la cual a su vez se oxida mediante solución de dicromato de potasio y ácido sulfúrico concentrado, el exceso de ácido crómico no reducido por la materia orgánica, es determinado por titulación frente al sulfato ferroso amoniacal, usando di fenilamina como indicador.

Para determinar este contenido de materia orgánica se introduce en un vaso de precipitado 0,40g de material, se adiciona 10ml de dicromato de potasio 1N, 20ml de ácido sulfúrico concentrado, este se debe agitar y dejar enfriar. Luego se adicionan 130ml de agua destilada, la cual se deja enfriar y se agrega 10 ml de ácido fosfórico, 1ml de indicador. Finalmente se titula con sulfato ferroso amoniacal hasta el punto final que se indica por la aparición de un color verde brillante. (webdelprofesor)

### 3.6.5 Resultados y Análisis

En la Tabla 9 se observa los resultados del análisis elemental realizado a la muestra de cáscara de *Jatropha Curca*.

Tabla 9. Resultados Análisis Elemental

MÉTODO DE REFERENCIA	PARÁMETRO	RESULTADO
SM 4500 N <sub>org</sub> B; Ed. 2005	Nitrógeno total Kjeldahl	0.87%
SM 4500 PE; Ed. 2005	Fósforo total	34.021 mg P/L
Digestión vía húmeda Walkley-Black	Carbono orgánico total	230225.105 mg/kg

Se observa que el contenido de Nitrógeno de la muestra es de 0,87% el cual comparado con la contenido de nitrógeno de la madera de pino (0.07%), es muy alto, quiere decir entonces que al hacer la combustión con la cáscara de *Jatropha* se formaran más óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>). Los óxidos de nitrógeno causan destrucción de la capa de ozono y lluvia acida.(ambientum, 2012)

### 3.7 CUANTIFICACIÓN DE CENIZAS POR EL MÉTODO DE PÉRDIDAS POR VOLATILIZACIÓN

Las cenizas en el proceso de combustión son de mucha importancia debido a que estas absorben el calor dificultando así el contacto entre oxidante y el residuo carbonoso, aunque esto depende de la composición del combustible. (unalmed)

#### 3.7.1 Objetivo de la prueba

Determinar el porcentaje de cenizas que se obtiene después de quemar cáscara de *Jatropha Curca*.

Se lleva una muestra de cáscara de *Jatropha Curca* al grupo interdisciplinario de estudios moleculares (GIEM) de la universidad de Antioquia, con el fin de determinar el porcentaje de cenizas de la muestra.

#### 3.7.2 Materiales, equipos y métodos grupo interdisciplinario de estudios moleculares (GIEM)

- ✓ Balanza analítica
- ✓ Mufla
- ✓ Desecador
- ✓ Crisoles de porcelana

Para determinar la cuantificación de cenizas se utilizó el método de pérdidas por volatilización descrito en la norma técnica colombiana NTC 5167.

Este método se basa en la aproximación del contenido de materia orgánica presente en el producto, el cual considera que el 100% del producto menos la suma del porcentaje de cenizas, carbonatos y humedad refleja el contenido de materia orgánica. (ICONTEC, 2004)



### 3.7.3 Resultados y Análisis

En la Tabla 10 se muestran los resultados obtenidos de las dos (2) pruebas realizadas por el grupo interdisciplinario de estudios moleculares (GIEM), según la normativa colombiana NTC 5167.

Tabla 10. Resultados porcentaje de cenizas GIEM

PARÁMETRO	TÉCNICA	NORMA	RESULTADO %
Cenizas	Gravimétrica	NTC 5167	8.18
Cenizas	Gravimétrica	NTC 5167	8.40

Se puede observar que el porcentaje de cenizas para la *Jatropha Curca* está por encima del 8%, este porcentaje es alto si se compara con la madera de pino, la cual está alrededor del 0.34%, en la Tabla 11 se puede observar los porcentajes de cenizas para algunos tipos de pino que se encuentran en el mercado.

Tabla 11. Porcentajes de cenizas para unas especies de pino

ESPECIE	PORCENTAJE DE CENIZAS
P. teocote	0.30
P. michoacana	0.33
P. leiophyla	0.34
P. montezumae	0.28
P. oocarpa	0.32

(Santiago, 2008)

La cantidad de cenizas es muy importante en la combustión, ya que estas retienen el calor, dificultando así la buena combustión dentro del hogar del quemador.

### 3.8 IMÁGENES DE MICROSCOPIO DE LA CÁSCARA DE JATROPHA

Las imágenes de microscopio permiten realizar observaciones cualitativas de las estructuras y las fases de las muestras.

#### 3.8.1 Objetivo de la prueba

Observar la estructura de la cáscara de *Jatropha Curca* y reconocer las diferentes capas que la constituyen.

#### 3.8.2 Materiales, métodos y equipos.

Se toman una serie de micrografías de la cáscara de *Jatropha Curca*, utilizando un microscopio digital, el cual está ubicado en el laboratorio de suelos y concretos de la universidad EAFIT, se muestra en la Ilustración 19.

Ilustración 19. Microscopio Carl zeiss 383000051 MWIB

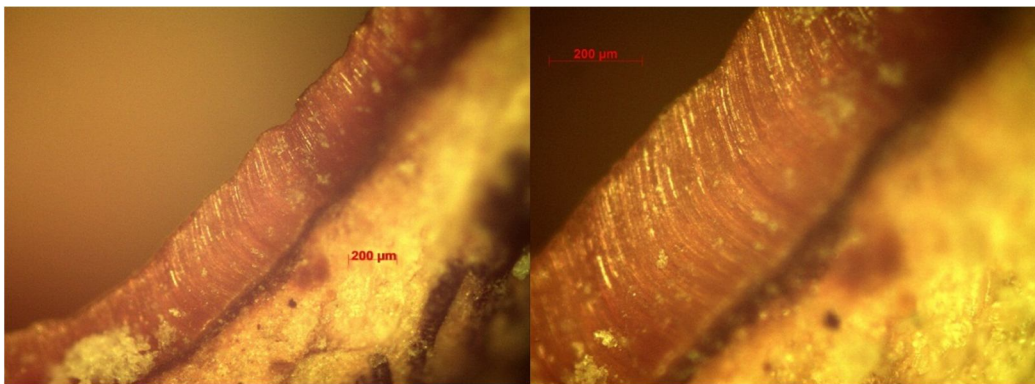


Se utilizan muestras de cáscara *Jatropha Curca*, las cuales son cortadas de manera que se puedan apreciar las diferentes capas.

### 3.8.3 Resultados y análisis

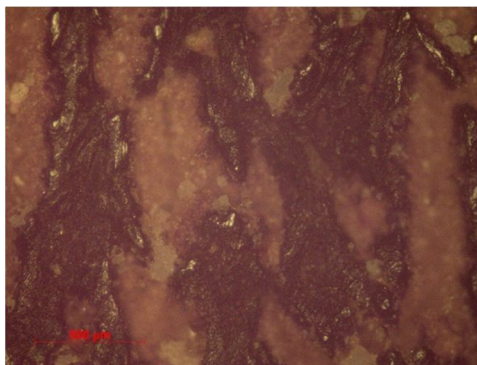
A continuación, se presentan las imágenes obtenidas con el microscopio digital. En Ilustración 20, se muestra un corte transversal de la cáscara. Se puede observar que está constituida por tres capas. En el lado izquierdo de la imagen está la capa interna. Luego se observa una capa porosa intermedia, y finalmente, a la derecha, está la capa externa.

Ilustración 20. Borde de la cáscara de *Jatropha Curca*



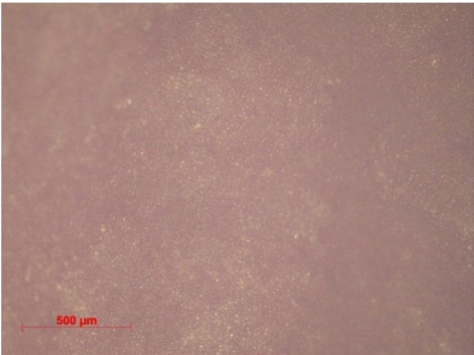
También, se toman imágenes de la capa interna y de la capa externa. En la Ilustración 21, se puede observar la capa externa. La cual no es homogénea y parece estar constituida por dos fases distintas.

Ilustración 21. Cara externa de la cáscara



En la Ilustración 22 se observa la parte interna, la cual es aparentemente más homogénea.

Ilustración 22. Cara interna de la cáscara



## 4 EVALUACIÓN CUALITATIVA DE LAS CONDICIONES DE COMBUSTIÓN DE LA CÁSCARA DE JATROPHA CURCA

La evaluación cualitativa califica la calidad de los procesos, al igual que su aprovechamiento al momento de la prueba. En este capítulo, se muestran los diferentes procesos que se le realiza a la cáscara de Jatropha Curca, con el fin de definir las condiciones de combustión a las cuales debe ser sometida.

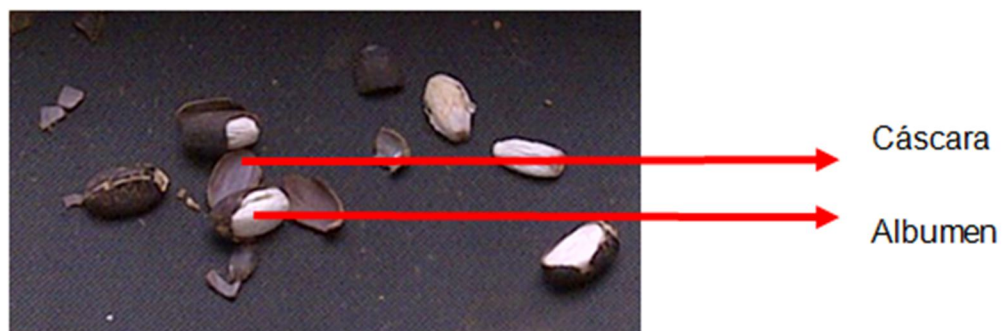
### 4.1 ENSAYOS DE COMBUSTIÓN ATMOSFÉRICA

Se realizan una serie de ensayos de combustión de la cáscara con aire atmosférico, sin ningún tipo de encerramiento. A continuación, se presenta los métodos utilizados y los resultados. El objetivo de estos ensayos es para determinar las condiciones de combustión más apropiadas.

#### 4.1.1 Separación de la cáscara y el albumen de Jatropha Curca.

Para realizar los ensayos, es necesario separar la cáscara del albumen, como se muestra en la Ilustración 23.

Ilustración 23. Cáscara y Albumen de la Jatropha Curca



Para esto se utiliza un triturador de semillas, el cual es facilitado por el laboratorio de energía de la Universidad EAFIT, en la Ilustración 24 se muestra este aparato.

Ilustración 24. Máquina trituradora de semillas



Luego de este procedimiento se obtiene la cáscara como se muestra en la Ilustración 25, teniendo la cáscara se procede a triturarla.

Ilustración 25. Cáscara de Jatropha Curca



#### 4.1.2 Triturado de la cáscara de Jatropha Curca

Para obtener los distintos tamaños de cáscara, se utiliza el molino de bolas, el cual está ubicado en el laboratorio de manejo de sólidos de la universidad EAFIT. Dentro del cilindro recipiente se vierte la muestra junto con los balines de hierro, luego se sella el cilindro recipiente con una tapa, después de este procedimiento el cilindro es ubicado entre los dos rodillos giratorios, entonces se procede a activar

el motor por medio de un controlador de velocidad y de tiempo de giro, como efecto de la rotación los balines suben y caen sobre la muestra fracturándola y así obtener los diferentes tamaños de muestra.

En la Ilustración 26 se muestra la cáscara de *Jatropha Curca*, después del ser sometida al procedimiento con el molino de bolas.

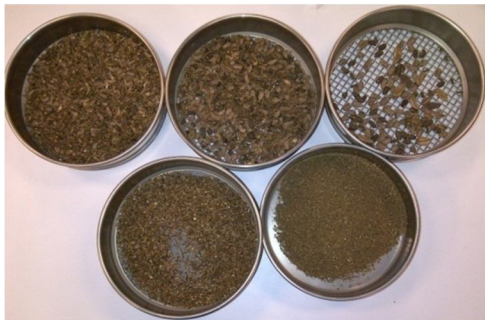
Ilustración 26. Cáscara de *Jatropha Curca* partida



#### 4.1.3 Clasificación de la cáscara de *Jatropha Curca*

Se utiliza el método de granulometría para obtener los distintos tamaños de muestra, para esto se utiliza una columna de tamices, y un tamizador. Luego de obtener los distintos tamaños de cáscara como se muestra en la Ilustración 27, se procede a pesar las cantidades obtenidas con el fin de representarlo en porcentaje de cantidad.

Ilustración 27. Tamaños de grano



Se utilizó para este procedimiento una masa de cáscara de 2400 g, en la Tabla 12 se muestra la distribución de pesos con sus respectivos porcentajes.

Tabla 12. Cantidades de cada tamaño de la muestra

TAMIZ NUMERO	TAMAÑO DE GRANO	PESO (g)	PORCENTAJE
1/4"	Grande	217.5	9.06
4	Mediano	438.2	18.26
8	Pequeño	1115.2	46.47
16	Pulverizado	629.1	26.21
	TOTAL	2400	100

Luego de tener los diferentes tamaños de muestra se procede a realizar los ensayos de quema sobre la cáscara.

#### 4.1.4 Quema atmosférica de la cáscara de *Jatropha Curca*.

Este ensayo se realiza con el fin de obtener datos relevantes y con esto establecer las condiciones inicial es de quema para la muestra y qué tipo de tamaño de cáscara reacciona mejor en la combustión.

Para realizar este ensayo es necesario contar con los siguientes materiales y equipos:

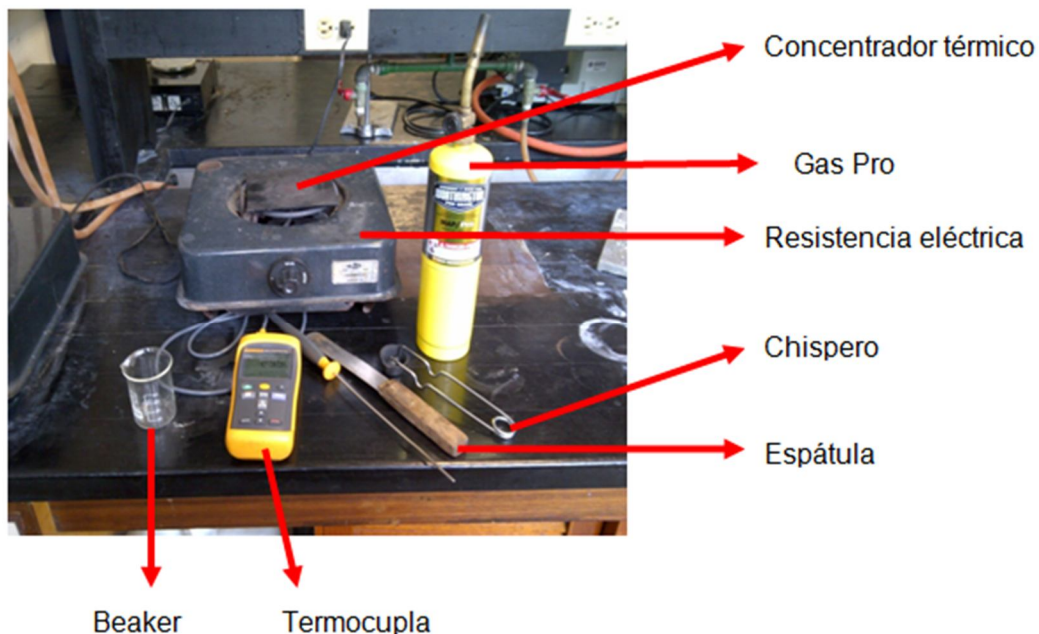
- ✓ Resistencia eléctrica
- ✓ Parrilla
- ✓ Concentrador térmico (Placa)
- ✓ Termopar
- ✓ Soplete
- ✓ Chispero
- ✓ Cronómetro
- ✓ Balanza digital
- ✓ Vaso de precipitados



- ✓ Papel aluminio

Lo anterior se puede observar en la Ilustración 28 este ensayo se realiza en el laboratorio de fisicoquímica ubicado en la Universidad EAFIT.

Ilustración 28. Elemento utilizados para la quema de la muestra



Se utiliza una resistencia eléctrica con el fin de obtener una temperatura constante, y así determinar a qué temperatura debe estar la cámara de combustión del prototipo de quemador a construir, para esto la resistencia eléctrica posee tres condiciones de calentamiento, como se muestran en la Tabla 13, estas temperaturas se obtienen de la parrilla utilizando un termopar.

Tabla 13. Condiciones de calentamiento resistencia eléctrica

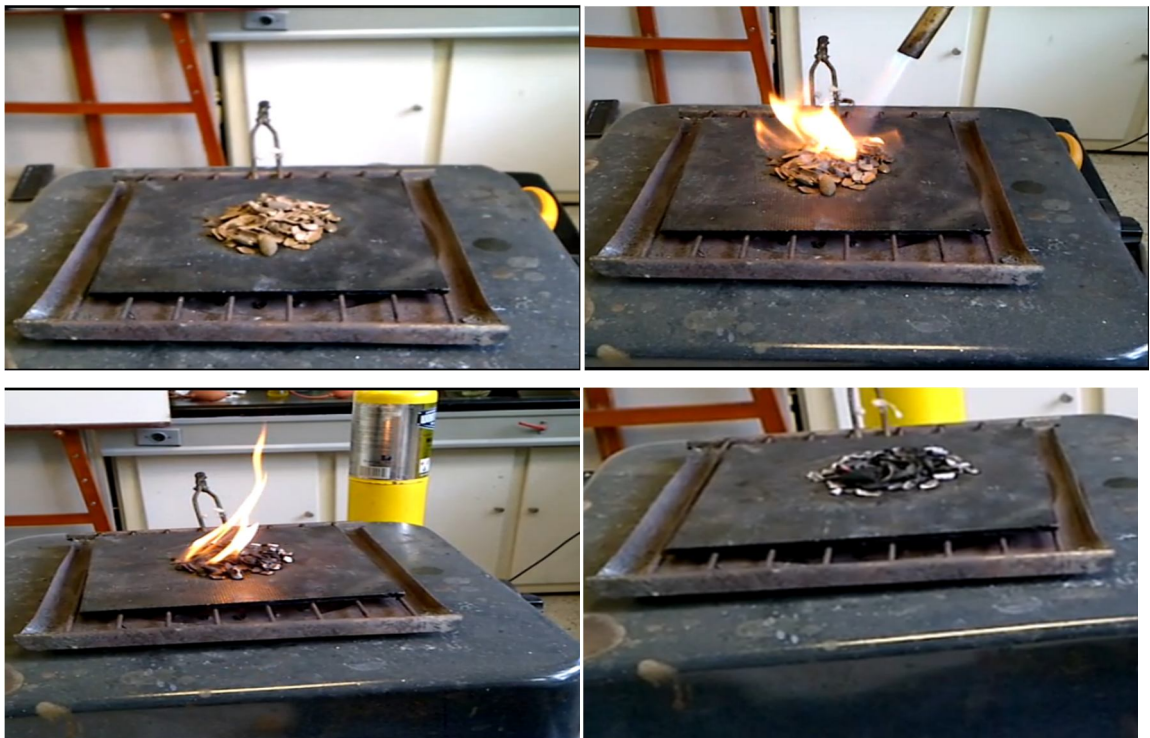
ESTADO	TEMPERATURA (°C)
Bajo	212
Medio	450
Alto	535

Para cada uno de estos estados se realiza las pruebas de combustión con los cuatro tamaños de grano clasificados previamente, lo que da un total de 12 pruebas, cabe destacar que la cáscara no ha sido secada previamente.

El porcentaje de cenizas, se determina pesando el residuo final de la combustión. Se establece 10g como un peso estándar para cada muestra y se realiza una prueba para cada tamaño de cáscara con cada temperatura.

En la Ilustración 29 se muestran los pasos de esta prueba.

Ilustración 29. Quema atmosférica de cáscara de *Jatropha Curca*



El procedimiento para las pruebas es el siguiente:

- Se enciende la resistencia eléctrica y se ubica sobre ésta el concentrador térmico.

- Luego se pone la muestra sobre el concentrador térmico y se deja calentar por aproximadamente 30 segundos.
- Se utiliza el soplete para dar inicio a la quema de cáscara.
- Se registra el tiempo de duración de la llama.
- Una vez la llama se ha apagado, las cenizas son puestas en papel aluminio y depositadas en un vaso de precipitados para ser pesadas.

En la Tabla 14, se muestran los resultados obtenidos después de la quema atmosférica.

Tabla 14. Resultados quema atmosférica de cáscara

TAMAÑO CÁSCARA	TEMPERATURA RESISTENCIA	DURACION DE LLAMA	PESO INICIAL (g)	PORCENTAJE DE CENIZA (%)
Grande	ALTO (535°C)	1:05 min	10	30.73
	MEDIO (450°C)	2:13 min	10	20.71
	BAJO (212°C)	5.21 sg	10 gr	40.48
Mediano	ALTO (535°C)	1:39 min	10	30.4
	MEDIO (450°C)	50:21sg	10	20.88
	BAJO (212°C)	No se sostiene	10	60.19
Pequeño	ALTO (535°C)	No se sostiene	10	No se obtiene
	MEDIO (450°C)	No se sostiene	10	No se obtiene
	BAJO (212°C)	No se sostiene	10	No se obtiene
Pulverizado	ALTO (535°C)	No se sostiene	10	No se obtiene
	MEDIO (450°C)	No se sostiene	10	No se obtiene
	BAJO (212°C)	No se sostiene	5	No se obtiene

Según los resultados obtenidos el tamaño de grano que más tiempo sostiene la llama es el grande a una temperatura de 450°C. También es el tamaño de grano

con menor porcentaje de cenizas después de realizada la prueba de quema atmosférica.

## 4.2 ENSAYO EN UN MODELO DE COMBUSTOR

Luego de las pruebas de quema atmosférica, se quiere someter a la muestra a unas condiciones más parecidas a la combustión dentro de un hogar. Entonces se construye un combustor casero utilizando tarros de pintura.

### 4.2.1 Construcción del combustor.

Luego de recolectar información de combustores caseros para madera, se procede a realizar la construcción de un modelo de combustor, el cual tiene condiciones básicas a las cuales será sometida la muestra.

Para la construcción del combustor se utilizaron los siguientes implementos:

- ✓ 1 tarro metálico de 1gl.
- ✓ 3 tarros metálicos de 1/4gl.
- ✓ Arenilla

Este combustor se construyó utilizando los diferentes recursos que suministra la Universidad EAFIT, en la Ilustración 30 se muestra el proceso de construcción del combustor de pruebas.

Ilustración 30. Construcción del combustor



En la Ilustración 31, se observan las partes del combustor. El tarro de galón es utilizado como una camisa exterior y se utiliza uno de los tarros de 1/4gl como cámara de combustión u hogar, este se encuentra ubicado dentro de la camisa. La cámara de combustión está conectada al segundo tarro de 1/4gl que funciona como alimentador de la muestra, y el tercer tarro está conectado a la parte superior de la cámara como chimenea o arrastre, por donde son evacuados los gases producto de la combustión y la energía calórica.

Ilustración 31. Partes del combustor



Entre la camisa y la cámara de combustión existe un aislamiento, como se observa en la Ilustración 32, consiste en un colchón de arenilla, esto con el fin de reducir las pérdidas de calor y alcanzar mayores temperaturas de combustión.

Ilustración 32. Combustor de pruebas



#### 4.2.2 Pruebas de quema de cáscara de Jatropha Curca en el combustor.

Luego de tener el combustor ensamblado se procede a realizar las pruebas de quema de cáscara de Jatropha Curca, para definir las condiciones con las cuales se debe construir el prototipo final.

Para obtener una temperatura adecuada dentro de la cámara de combustión, se realiza un precalentamiento, utilizando aserrín como combustible, como se observa en la Ilustración 33.

Ilustración 33. Precalentado del sistema



Luego de este precalentamiento, se retiran las cenizas de aserrín y se procede a ingresar la muestra. Para la realizar este ensayo se utilizan los siguientes materiales y equipos:

- ✓ Cáscara de Jatropha Curca
- ✓ Combustor
- ✓ Termopar
- ✓ Gas Pro
- ✓ Chispero
- ✓ Espátula
- ✓ Cronómetro

Algunos de estos elementos se pueden observar en la Ilustración 34, los ensayos se realizan en el laboratorio de fisicoquímica de la Universidad EAFIT

Ilustración 34. Elementos utilizados prueba de quema en el combustor



Se utiliza como combustible la cáscara de Jatropha Curca de tamaño grande (tamiz número 1/4”), ya que es la que posee mejor desempeño durante las pruebas de combustión atmosférica.

Se ingresa la muestra a la cámara de combustión y se inicia la llama utilizando el soplete. Se observa que la cáscara se enciende dentro de la cámara, pero al retirar el soplete la llama no se sostiene por más de 5 segundos.

Luego de varios ensayos se decide retirar un poco la muestra, acercándola más a la entrada aire, y es aquí donde ocurre que la llama se sostiene, sin intervención del soplete. Lo anterior se muestra en la Ilustración 35 e Ilustración 36.

Ilustración 35. Quema de cáscara en la cámara de combustión



Ilustración 36. Quema de cáscara en el borde del ducto



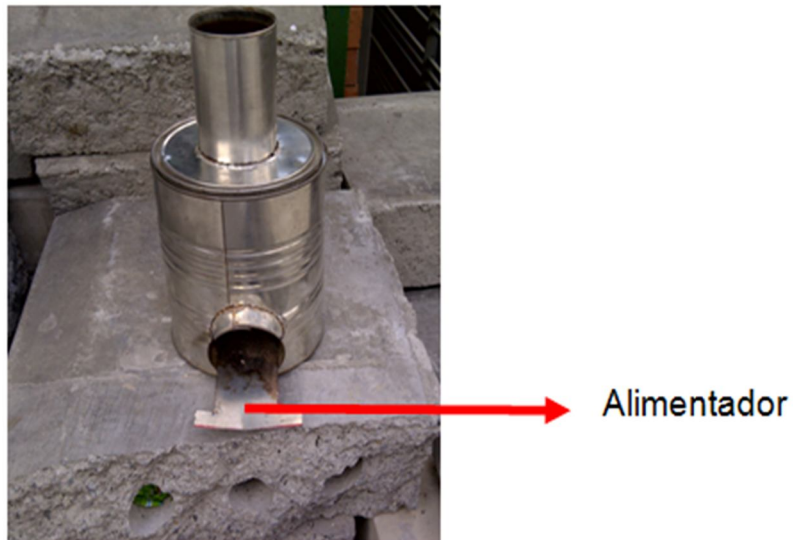
La prueba también se realiza con el tamaño de cáscara mediano y se observa el mismo fenómeno. Dentro de la cámara de combustión la llama no se sostiene por más de 12 segundos, y cuando se retira un poco de la muestra hacia el extremo del conducto alimentador, inmediatamente se generó llama sobre la cáscara y se sostiene por más tiempo.



Con el combustor construido, se pudo observar muchos factores a tener en cuenta para el diseño del prototipo final, los cuales se listan a continuación:

- El diseño para el prototipo de quemador debe tener una cámara de combustión más grande en el cual la cáscara se pueda distribuir y no quede tan saturada.
- Se debe incluir un sistema de ventilación que permita una entrada constante de flujo de aire.
- Se debe incluir un sistema alimentador de combustible con un flujo de entrada de combustible constante, ya que el combustor construido no posee un buen sistema de alimentación de combustible como se observa en la Ilustración 37.

Ilustración 37. Alimentador del combustor



## 5 DISEÑO DEL PROTOTIPO QUEMADOR DE LECHO ESTACIONARIO

La *Jatropha Curca* se utiliza para fabricar biodiesel, un subproducto de este proceso es la cáscara. A este subproducto se le puede dar un uso, también, como combustible.

La combustión es una reacción química de oxidación, la cual desprende una gran cantidad de energía en forma de luz y calor. Utilizar este recurso para producir esa energía requiere poco procesamiento, pero es necesario diseñar un equipo que cumpla con las condiciones en las cuales se le pueda sacar el mejor provecho.

### 5.1 PLANEAMIENTO DEL PROBLEMA DE DISEÑO

El objeto de diseño es un prototipo de quemador de lecho estacionario que use como combustible cáscara de *Jatropha Curca*, la razón de alimentación de la muestra, el sistema de ventilación, determinan las condiciones de operación del mismo.

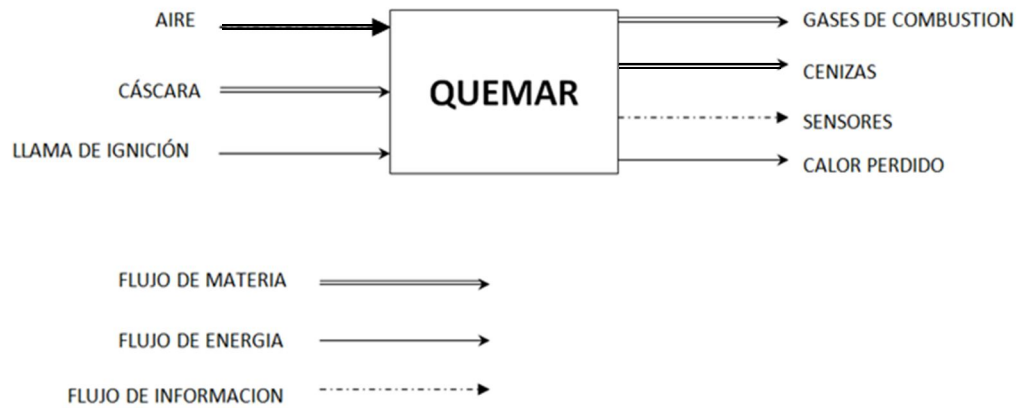
### 5.2 ANALISIS FUNCIONAL

El análisis funcional tiene como objetivo conocer todas las acciones que tiene un espacio dentro de una determinada actividad, este análisis identifica los flujos de energía, materia e información a través de todos los elementos. Es por esta razón que se debe empezar por este análisis funcional, ya que muestra las relaciones de cada uno de los elementos que conforman el equipo técnico.

#### 5.2.1 Caja negra del prototipo de quemador de cáscara de *Jatropha Curca*.

La caja negra es una vista global, donde se muestran los principales flujos de entrada y salida. En la Ilustración 38, se muestra el esquema gráfico y la caja negra.

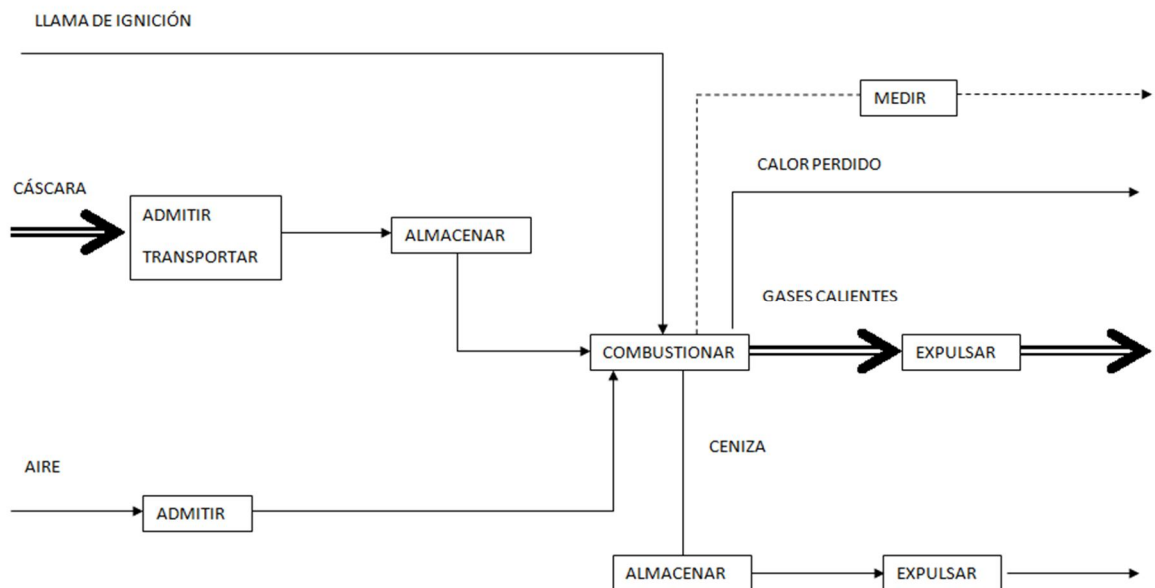
Ilustración 38. Caja negra del quemador



### 5.2.2 Estructura funcional del prototipo de quemador

La estructura funcional consiste en la desintegración de la función principal, en funciones secundarias. En la Ilustración 39, se muestra la estructura funcional para el prototipo de quemador.

Ilustración 39. Síntesis funcional de un prototipo de quemador



### 5.3 MATRIZ MORFOLÓGICA

La matriz morfológica es un método el cual sirve para dar opciones de solución a cada una de las tareas de la estructura funcional y definir los componentes del prototipo. En la Tabla 15, se muestra la matriz morfológica que se le realiza para el prototipo de quemador.

Tabla 15. Matriz morfológica para un prototipo de quemador

SOLUCION FUNCION	SOLUCION 1	SOLUCION 2	SOLUCION 3
ALIMENTAR	Plano inclinado	Tolva	Tornillo alimentador
VENTILACION	Ventilador		
RETIRAR CENIZAS	Fondo removible	Bandeja	Girar el fondo del quemador
INICIO DE LLAMA	Llama de gas propano	Combustible iniciador de llama	
CAMARA DE COMBUSTION	Cavidad cilíndrica	Cavidad cúbica	
AISLAMIENTO	Arenilla	Manta cerámica	Vermiculita

### 5.4 EVALUACIÓN PREVIA

Las situaciones descritas en la matriz morfológica, debe ser evaluadas, teniendo como base su dificultad, su afinidad con las especificaciones, capacidad para ser realizadas, y su aporte para la realización del proyecto.

Un aporte puede ser considerado positivo, negativo o indiferente, si un aporte es considerado negativo este se descarta automáticamente. En la Tabla 16 se muestran los criterios usados para determinar la mejor solución.

Tabla 16. Criterios de evaluación para las soluciones

CRITERIO	CALIFICACIÓN		
	POSITIVA +	INDIFERENTE =	NEGATIVA -
Complejidad	Poco complejo	Complejidad media	Muy complejo
Capacidad técnica	Se está en capacidad de producirlo	Puede adquirirse la capacidad técnica para producirlo	No se tiene la capacidad técnica para producirlo
Facilidad en la operación	La operación resulta obvia y no se requiere capacitación	La operación resulta sencilla, aunque requiere algo de capacitación	La operación resulta compleja.

En la Tabla 17 se muestra la evaluación de cada una de las soluciones propuestas.

Tabla 17. Evaluación de los principios de solución

SOLUCION / FUNCION	SOLUCION 1	SOLUCION 2	SOLUCION 3
ALIMENTAR	Plano inclinado	Tolva	Tornillo alimentador
Complejidad	+	-	=
Capacidad técnica	+	+	+
Facilidad de operación	+	-	=
VENTILAR	Ventilador		
Complejidad	+		
Capacidad técnica	+		
Facilidad de operación	=		
ALMACENAR Y RETIRAR CENIZAS	Fondo removible	Bandeja	Girar el fondo del quemador
Complejidad	-	+	+
Capacidad técnica	+	+	+
Facilidad de operación	-	=	=
IGNICION DE LLAMA	Llama de gas propano	Combustible iniciador de llama	
Complejidad	+	+	
Capacidad técnica	+	+	
Facilidad de operación	=	=	
CAMARA DE COMBUSTION	Cavidad cilíndrica	Cavidad cúbica	
Complejidad	+	-	
Capacidad técnica	+	=	
Facilidad de operación	=	=	
AISLAMIENTO	Arenilla	Manta cerámica	Vermiculita
Complejidad	+	=	-
Capacidad técnica	+	+	-
Facilidad de operación	=	=	=

Principio de solución pertinente	
Principio de solución descartado	

## 5.5 CONCEPTOS DE SOLUCION

Luego de depurar la matriz morfológica se procede a definir los conceptos de solución. En este procedimiento se combinan todas las soluciones planteadas, teniendo en cuenta su compatibilidad con las otras secciones. De lo anterior se obtienen dos soluciones que se muestran en la Tabla 18 y Tabla 19.

Tabla 18. Concepto de solución 1

FUNCIÓN	PRINCIPIO DE SOLUCIÓN
ALIMENTAR	Tornillo alimentador
VENTILACION	Ventilador
ALMACENAR Y RETIRAR CENIZAS	Girar el fondo del quemador
INICIO DE LLAMA	Combustible iniciador de llama
CAMARA DE COMBUSTION	Cavidad cilíndrica
AISLAMIENTO	Manta cerámica

Tabla 19. Concepto de solución 2

FUNCIÓN	PRINCIPIO DE SOLUCIÓN
ALIMENTAR	Plano inclinado
VENTILACION	Ventilador
ALMACENAR Y RETIRAR CENIZAS	Bandeja
INICIO DE LLAMA	Llama de gas propano
CAMARA DE COMBUSTION	Cavidad cilíndrica
AISLAMIENTO	Arenilla

Evaluando las alternativas anteriores, se decide construir el concepto de solución 1, ya que es un sistema más viable y accesible para efectos de diseño y construcción.

## 5.6 DIMENSIONAMIENTO

La finalidad del proyecto es diseñar y construir un prototipo de quemador que utilice como combustible cáscara de *Jatropha Curca*. El prototipo a construir tendrá una potencia de diseño de 1.5 kW.

A continuación se realiza el análisis térmico para un prototipo de quemador de estas dimensiones.

### 5.6.1 Cálculo relación aire-combustible

Para establecer los flujos máxicos de aire y combustible requeridos se debe determinar primero la relación aire –combustible. En la

Tabla 20 se listan las fracción máxicas de los elementos que conforman la cáscara (Kratzeisen & Müller, 2013).

Tabla 20. Fracciones máxicas de los elementos en la cáscara

COMPUESTO	CARBONO %	HIDROGENO %	OXIGENO %	NITRÓGENO %	CLORO %	AZUFRE %
Fracción molecular (fm)	50.9	5.8	39.5	0.8	0.12	0.08

La fracción máxica se define como:

$$f_{mi} = \frac{m_i}{m_m}$$

La fracción molecular se define como:

$$y = \frac{N_i}{N_m}$$



Las fracciones másicas deben convertirse en fracciones moleculares, por lo cual se debe encontrar el peso molecular de la mezcla. Este se encuentra como:

$$M_M = \frac{1}{\sum \frac{f_{mi}}{M_i}}$$

Con los datos de la

Tabla 20 se encuentra que:

$$M_M = 7.953 \frac{kg}{Kmol}$$

La fracción molecular se encuentra como:

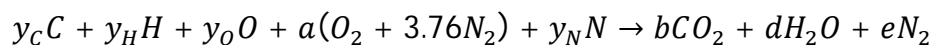
$$y_i = f_{mi} \frac{M_M}{M_i}$$

En la Tabla 21 se muestran las fracciones moleculares de diferentes elementos.

Tabla 21. Fracciones moleculares de los elementos en la cáscara

COMPUESTO	CARBONO	HIDROGENO	OXIGENO	NITRÓGENO	CLORO	AZUFRE
	%	%	%	%	%	%
Fracción molecular (y)	33.7	46.12	19.6	0.45	0.027	0.020

Para determinar la relación aire combustible se considera la siguiente reacción química.



Los balances de masa de los diversos elementos requieren que:

$$C: y_C = b$$

$$H: y_H = 2d$$

$$O: y_O + 2a = 2b + d$$

De donde se encuentra que:

$$a = \frac{2y_C + y_H/2 - y_0}{2}$$

Para el caso de la cáscara de Jatropha Curca  $a = 0.354$ .

$$\left(\frac{A}{C}\right)_T = 1.686 \frac{\text{kmol}_{\text{aire}}}{\text{kmol}_{\text{combustible}}} = 6.14 \frac{\text{kg}_{\text{aire}}}{\text{kg}_{\text{combustible}}}$$

### 5.6.2 Flujo de aire y combustible.

La potencia de diseño es de 1.5kW, con este valor se obtiene el flujo másico de combustible,

$$\dot{m}_c = \frac{P_g}{PCI}$$

Con un poder calorífico inferior de 16520 kJ/kg (Kratzeisen & Müller, 2013), no se utiliza el poder calorífico para la cáscara de Jatropha Curca ya determinado porque este valor es el poder calorífico superior, el flujo másico de combustible requerido es: 0.327 kg/h.

El flujo másico de aire se encuentra como:

$$\dot{m}_a = (1 + e) \left(\frac{A}{C}\right)_T \dot{m}_c$$

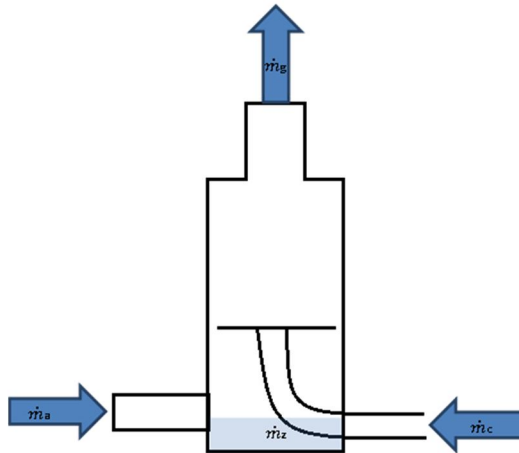
En donde se utiliza un exceso de aire del 30%. En este caso el flujo másico de aire requerido es de: 2.609 kg/h. Lo que equivale a un caudal de 43.52 LPM, con una presión atmosférica de 85.5 kPa y una temperatura de 25°C.

### 5.6.3 Balance de masa para el quemador

En la Ilustración 40 se presenta un esquema de los flujos másicos en el prototipo de quemador. Al quemador entran el flujo másico de combustible y de aire; y sale el flujo másico de gases de combustión. Durante la combustión también se generan cenizas, las cuales se almacenan en la parte inferior, sin embargo para

efectos de análisis se considera que la cámara de combustión es el espacio por encima de la parrilla.

Ilustración 40. Esquema de flujos másicos en el prototipo de quemador



El balance de masa implica que:

$$\dot{m}_a + \dot{m}_c = \dot{m}_g + \dot{m}_z$$

El análisis de cenizas arroja un contenido de 8.4%. En los ensayos de combustión atmosférica realizados el menor porcentaje de cenizas obtenido es cercano 20%. Para los cálculos térmicos se utiliza una fracción de cenizas del 15%. El flujo másico de cenizas se encuentra como:

$$\dot{m}_z = f_z \dot{m}_c$$

En este caso el flujo másico de cenizas es 0.049 kg/h. Así puede determinarse el flujo másico de los gases de combustión:

$$\dot{m}_g = \dot{m}_a + \dot{m}_c - \dot{m}_z$$

El flujo másico de los gases es: 2.887 kg/h

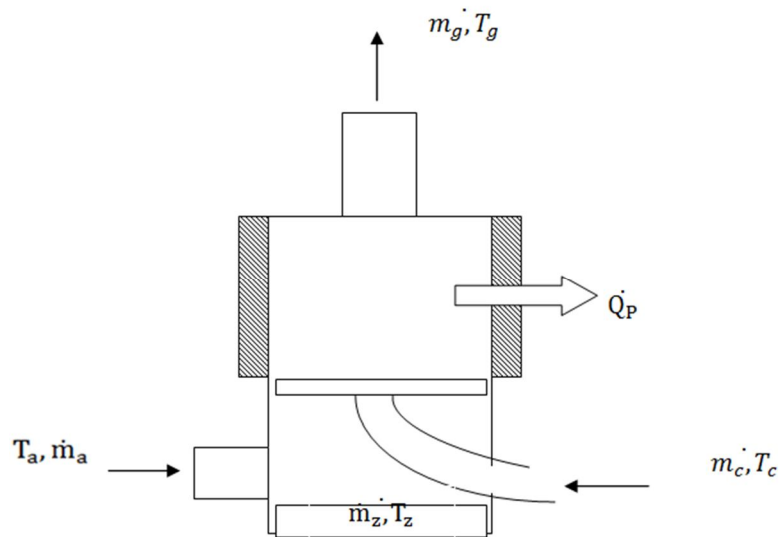
#### 5.6.4 Balance de energía

Para la operación en estado estacionario el balance de energía en el prototipo de quemador requiere que se cumpla:

$$\dot{m}_c PCI + \dot{m}_c c_{pc}(T_c - T_o) + \dot{m}_a c_{pa}(T_a - T_o) = \dot{Q}_p + \dot{m}_g c_{pg}(T_g - T_o) + \dot{m}_z c_{pz}(T_z - T_o)$$

En esta expresión  $T_o$  es la temperatura en condiciones estándar que es  $25^\circ\text{C}$ .

Ilustración 41. Esquema de flujos de energía



La razón de pérdida de calor se determina con el coeficiente global de transferencia de calor:

$$\dot{Q}_p = UA(T_z - T_o)$$

El producto del coeficiente global de transferencia de calor por el área superficial,  $UA$ , es  $0.797 \text{ W}/^\circ\text{C}$ , este valor se obtiene de un análisis de resistencias térmicas, considerando las pérdidas de calor por la pared cilíndrica y por la chimenea. Se utiliza un coeficiente de transferencia de calor por convección con el ambiente de  $5 \text{ W}/\text{m}^2\text{C}$  y una conductividad térmica del aislamiento con manta cerámica de  $0.25 \text{ W}/\text{m}^\circ\text{C}$ . El aire y el combustible entran a la temperatura ambiente, la cual es cercana a la temperatura estándar.

$$T_a \approx T_c \approx T_o$$

De esta manera la ecuación de balance de energía puede escribirse como:

$$\dot{m}_c PCI = UA(T_z - T_o) + \dot{m}_g c_{pg}(T_g - T_o) + \dot{m}_z c_{pz}(T_z - T_o)$$

El flujo de energía en la corriente de gases de combustión es:

$$\dot{Q}_g = \dot{m}_g c_{pg}(T_g - T_o) = \dot{m}_c PCI - UA(T_z - T_o) - \dot{m}_z c_{pz}(T_z - T_o)$$

Se supone que las cenizas salen a la temperatura a la que se encuentra el hogar. Con una temperatura de la cámara de combustión de 920°C el flujo de energía en la corriente de gases de combustión es de 777 W y la temperatura de los gases de combustión es 914°C. En estas condiciones la eficiencia de combustión del quemador es del 52%, entendiéndose esta como la relación entre el flujo de energía en la corriente de gases de combustión y la potencia de diseño.

#### 5.6.5 Área de la parrilla

El área de la parrilla debe ser apropiada para la potencia del prototipo de quemador. Para fogones de carbón de retorta sencilla con alimentación mecánica en la parte de abajo y parrilla estacionaria se recomienda que la carga no debe superar 97 kg<sub>carbón</sub>/h/m<sup>2</sup> (Shield, 1982). Considerando los poderes caloríficos del carbón y la cáscara de *Jatropha* esta carga sería equivalente, desde el punto de vista energético, a 163.4 kg<sub>cáscara</sub>/h/m<sup>2</sup>. Teniendo en cuenta la carga térmica admisible el área mínima de la parrilla se encuentra como:

$$A_{parrilla} = \frac{\dot{m}_c}{Carga}$$

Se encuentra que el área mínima de la parrilla debe ser 2.0\*10<sup>-3</sup> m<sup>2</sup>, lo que equivale a un diámetro de 5cm. Sin embargo, teniendo en cuenta la baja densidad aparente del combustible se decide hacer la parrilla de 15cm de diámetro.

### 5.7 Volumen del hogar

El volumen del hogar está relacionado con las temperaturas y con la intensidad de liberación de energía por unidad de volumen. Para fogones de carbón se recomienda que la relación de combustión no exceda 362.06 kW/m<sup>3</sup>(Shield, 1982). Teniendo en cuenta estas recomendaciones el volumen mínimo que debe tener el hogar se encuentra como:

$$V_{cámara} = \frac{P_g}{Relación\ Volumen}$$

El volumen mínimo para el hogar 4.14 L. Para cumplir con estas condiciones las dimensiones de la cámara de combustión deben ser: 16cm de diámetro y 20 cm de altura.

### 5.8 CARACTERÍSTICAS DEL DISEÑO

En la Tabla 22 se muestran las características del prototipo de quemador.

Tabla 22. Principales características del prototipo del quemador

CARACTERÍSTICA	VALOR
Forma del quemador	Cilíndrica
Tipo de alimentación combustible	Tornillo alimentador parte inferior
Potencia de diseño	1500W
Combustible	Cáscara de Jatropha Curca
Flujo másico de combustible	0.327 kg/h
Caudal de aire para combustión	43.52 LPM
Material aislante térmico	Manta cerámica
Material cámara de combustión	Lámina de acero
Diámetro de la cámara de combustión	16 cm
Altura de la cámara de combustión	20 cm

Tabla 22. Principales características del prototipo del quemador (cont)

CARACTERÍSTICA	VALOR
Diámetro de la parrilla	15 cm
Espesor del aislante térmico	2.5 cm
Diámetro del ducto de admisión de aire	7.6 cm
Diámetro de la chimenea	7.6 cm
Altura de la chimenea	12.2 cm
Diámetro tornillo alimentador	36 mm
Paso tornillo alimentador	24 mm
Longitud tornillo alimentador	100 mm
Temperatura cámara de combustión	920°C
Temperatura gases de combustión	914°C
Eficiencia térmica	52%

## NOMENCLATURA

SIMBOLO	DESCRIPCIÓN
$A_{parrilla}$	Área de la parrilla
$\left(\frac{A}{C}\right)_T$	Relación aire-combustible teórica
$c_{pg}$	Capacidad calorífica específica de los gases de combustión
$c_{pz}$	Capacidad calorífica específica de las cenizas
$f_{mi}$	Fracción másica
$\dot{m}_a$	Flujo másico del aire
$\dot{m}_c$	Flujo másico del combustible
$\dot{m}_g$	Flujo másico de gases
$m_i$	Masa de cada elemento
$M_i$	Peso molecular de cada elemento
$m_m$	Masa de la mezcla
$M_m$	Peso molecular de la mezcla
$\dot{m}_z$	Flujo másico de cenizas
$N_i$	Número de moles de cada elemento
$N_m$	Número de moles de la mezcla
$PCI$	Poder calorífico inferior
$P_g$	Potencia de diseño
$\dot{Q}_p$	Razón de pérdida de calor
$\dot{Q}_g$	Flujo de energía en la corriente de los gases
$T_o$	Temperatura en condiciones estándar
$y$	Fracción molecular
$UA$	Coficiente global de transferencia de calor * Área superficial
$V_{cámara}$	Volumen de la cámara de combustión



## 6 CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO DE QUEMADAOR

En este capítulo se muestra el proceso de construcción del prototipo de quemador, el quemador consta de:

- ✓ Cámara de combustión
- ✓ Fondo para almacenar las cenizas
- ✓ Tornillo alimentador
- ✓ Chimenea
- ✓ Parrilla
- ✓ Manivela
- ✓ Manta cerámica
- ✓ Tolva
- ✓ Ventilador
- ✓ Soporte
- ✓ Buje

### 6.1 CÁMARA DE COMBUSTIÓN

Se escogió un recipiente cilíndrico de 1 galón de capacidad que funcione como cámara de combustión, como se muestra en la Ilustración 42, para esto fue necesario remover el fondo de este cilindro y así poder ubicar la parrilla. Para remover este fondo se utilizó una cuchilla sinfín, luego de este proceso la cámara de combustión fue recubierta con Manta cerámica, y así poder mantener la temperatura de ésta. Lo anterior se muestra en la Ilustración 43.

Ilustración 42. Cámara de combustión



Ilustración 43. Cámara recubierta con el aislante

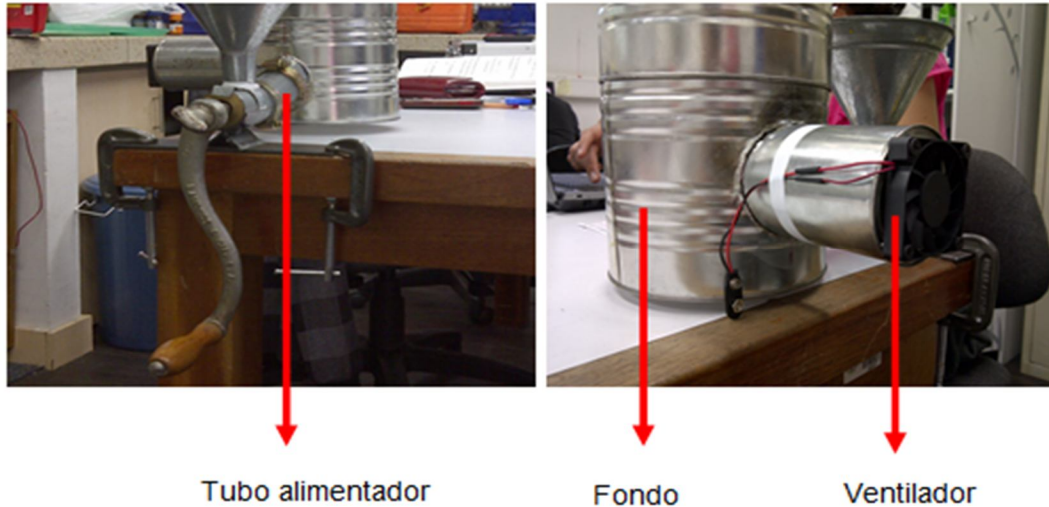


## 6.2 FONDO

Para construir este fondo se utiliza un recipiente cilíndrico de 1 galón, el cual es partido a la mitad, este va a estar conectado al ventilador, al tornillo alimentador y a la cámara de combustión.

Para partir a la mitad este cilindro se utiliza una cuchilla sinfín y para los agujeros conectores se utiliza tijera. En la Ilustración 44 se muestra el fondo del quemador con los conectores.

Ilustración 44. Fondo del quemador



### 6.3 TORNILLO ALIMENTADOR

Para alimentar el sistema se decide utilizar un tornillo sinfín transportador, este se utiliza en los molinos para procesar alimentos como se muestra en la Ilustración 45.

Ilustración 45. Molino corona



(thelondonprideproject, 2011)

Este tornillo se usa originalmente para triturar y comprimir, por tal motivo se le realiza modificaciones para lograr su función principal sea alimentar. Se desbasta la punta de este tornillo utilizando un esmeril, como se muestra en la Ilustración 46.

Ilustración 46. Tornillo alimentador



Este tornillo va recubierto por un tubo de 1-1/2", el cual funciona como camisa, por medio de este se transporta la cáscara de *Jatropha Curca*. Para accionar el sistema se utiliza la manivela del sistema original, el sistema se puede observar en la Ilustración.

Ilustración 47. Sistema de alimentación



## 6.4 CAMISA DEL TORNILLO ALIMENTADOR

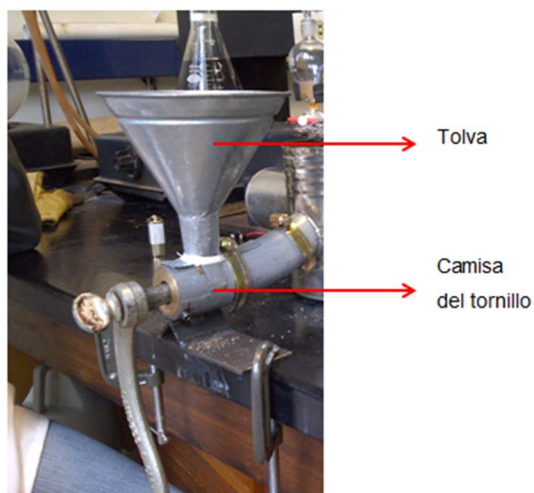
Como se mencionó anteriormente se utiliza un tubo de 1-1/2" galvanizado, este tubo se dobla con el fin que la muestra suba hasta la parrilla, donde ocurre la combustión. En la Ilustración 48 se muestra el proceso realizado para la camisa del tornillo alimentador.

Ilustración 48. Camisa del tornillo alimentador



Esta camisa posee un agujero en el cual se conecta la tolva alimentadora, este sistema se muestra en la Ilustración 49.

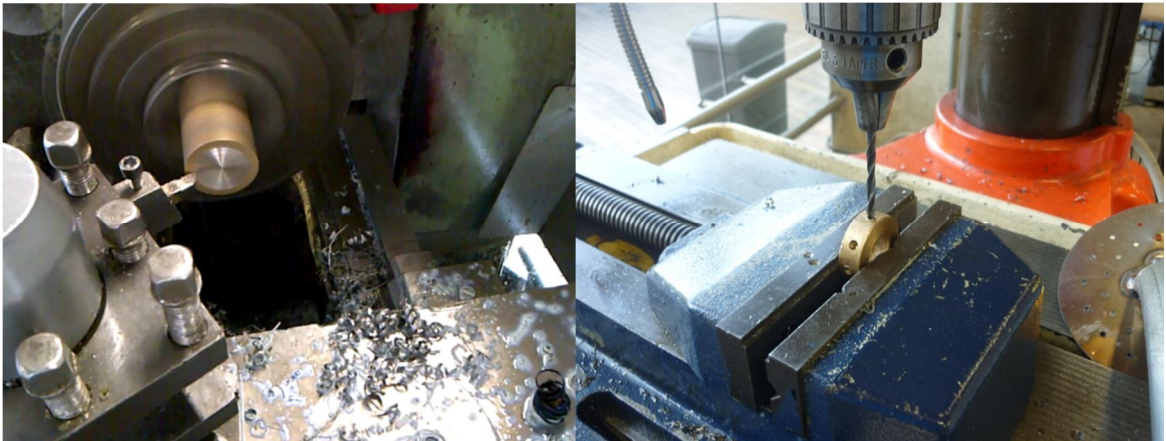
Ilustración 49. Camisa del tornillo y tolva alimentadora



## 6.5 BUJE DE BRONCE

La función de este buje es soportar y centrar el tornillo alimentador, este va ubicado entre el tornillo alimentador y la camisa del mismo. El buje va sujeto a la camisa del tornillo alimentador por medio de dos (2) tornillos prisioneros. La manufactura de este buje se realizó en el taller de máquinas y herramientas de la Universidad EAFIT en un torno. Los agujeros para los tornillos se realizan con la ayuda de un taladro de banco, en la Ilustración 50 se muestra el proceso.

Ilustración 50. Buje de cobre



## 6.6 VENTILADOR

Para el sistema de ventilación se utiliza un ventilador, el cual se obtiene de una base refrigerante para portátil, este se conecta a una fuente de energía para así obtener movimiento. El ventilador se acopla por medio de cuatro tornillos al ducto de ventilación, que se obtiene a partir de un recipiente de 1/4 de galón de capacidad. Este sistema se conecta al fondo del quemador, lo anterior se muestra en la Ilustración 51.

Ilustración 51. Sistema de ventilación



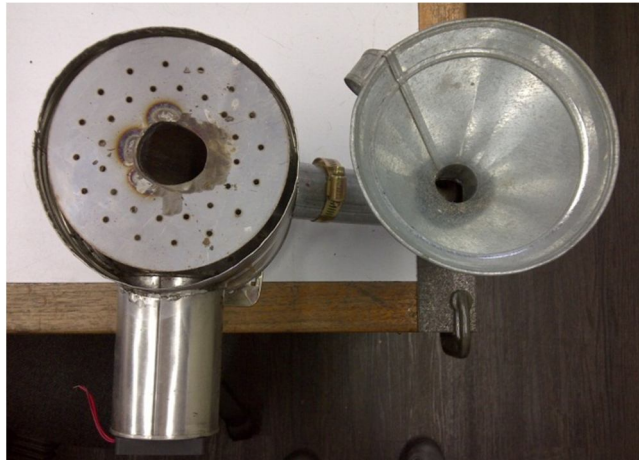
## 6.7 PARRILLA

Se utiliza para la parrilla una lámina de acero inoxidable, la cual está soldada a la camisa del tornillo por el cual se transporta la cáscara. El corte de esta lámina se realiza en la cortadora láser, ubicada en el primer piso del bloque de ingenierías de la universidad EAFIT. La lámina es soldada posteriormente a la camisa del tubo alimentador como se ve en la Ilustración 52. En la Ilustración 53 se observa la parrilla ubicada en su posición final.

Ilustración 52. Lamina en la cortadora laser



Ilustración 53. Parrilla en el sistema



## 6.8 TOLVA

Esta parte del sistema fue adquirida en una ferretería, tiene boca de salida de 1", esta va conectada al agujero ubicado en la parte superior de la camisa del tornillo como se muestra en la Ilustración 54.

Ilustración 54. Tolva alimentadora



Cáscara de  
*Jatropha curca*







## 7 PRUEBAS BÁSICAS DE OPERACIÓN DEL PROTOTIPO

La ejecución de las prueba para observar el comportamiento del prototipo de quemador construido permite completar el proceso de desarrollo, al ser un complemento para el proceso de diseño. Realizar pruebas es un método para evaluar el comportamiento real del equipo diseñado, y así poder ratificar las expectativas que se generan en la etapa de diseño.

### 7.1 INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN Y REGISTRO

Las pruebas de desempeño técnico del prototipo de quemador requieren del uso de instrumentos de medición, las variables que se deben medir son: temperatura en diferentes, flujo másico de combustible y caudal de aire. El análisis de gases de combustión también puede arrojar resultados interesantes. Sin embargo, en los ensayos realizados solo se toman datos de temperatura, alimentación del combustible y masa de cenizas.

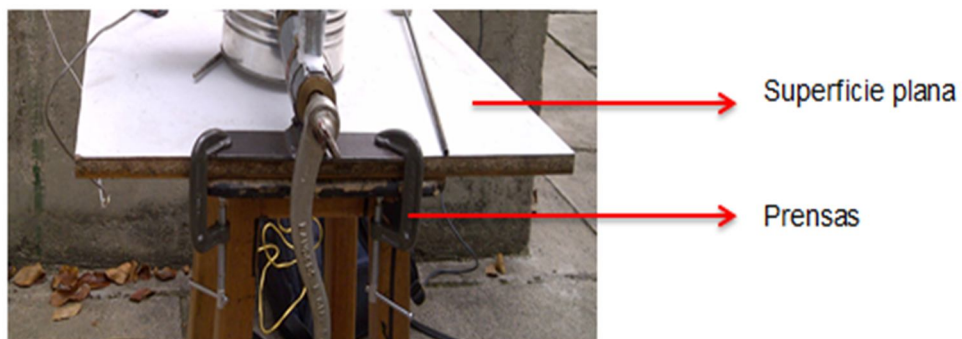
La medición de temperatura se realiza con termopares tipo K. Las temperaturas a medir son:

- ✓ Temperatura cámara de combustión (hogar)
- ✓ Temperatura del aislamiento
- ✓ Temperatura de la parrilla
- ✓ Temperatura de gases de combustión

## 7.2 DESCRIPCIÓN DEL MONTAJE PARA PRUEBAS

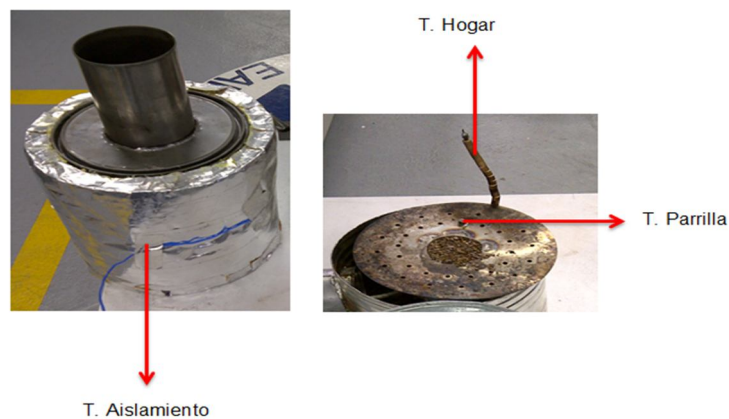
Las pruebas del prototipo de quemador se realizan en el laboratorio de operaciones unitarias de la universidad EAFIT, para esto se utiliza una superficie plana donde se ubica el quemador, el cual se sujeta por medio de unas prensas, como se observa en la Ilustración 57.

Ilustración 57. Sistema de sujeción



Luego se ubican los termopares en sus respectivos sitios y así poder obtener los datos de temperatura como se muestra en la Ilustración 58. La temperatura de los gases se realiza en la chimenea del prototipo de quemador.

Ilustración 58. Ubicación de termopares



Para la realización de esta prueba se utiliza una masa conocida de cáscara, esto con el fin de determinar en cuánto tiempo se consume toda esta muestra, se utiliza 440.18g de cáscara de *Jatropha Curca*. Se empieza este proceso con el tornillo lleno de cáscara de *Jatropha*, el cual tiene una capacidad de almacenamiento de 79.57g.

Se llena la tolva de cáscara y se empieza a alimentar el sistema, y así tener una muestra de cáscara esparcida por toda la parrilla, Para darle inicio a la llama de utiliza un combustible iniciador de llama, este es encendido con la ayuda de un encendedor, esto se muestra en la Ilustración 59.

Ilustración 59. Inicio de llama



Luego se ubica la cámara de combustión sobre el fondo, se enciende el ventilador, y se empieza a recoger datos de prueba. El método para determinar si se necesita abastecer el sistema de muestra es observando por la chimenea, por ahí se puede ver si el sistema ha consumido la muestra en la parrilla y si es necesario abastecer.

En la Ilustración 60 se muestra el ensamble final del sistema, sobre la superficie plana y con el instrumento de medición de temperaturas.

Ilustración 60. Ensamble final del sistema



### 7.3 RESULTADOS Y ANÁLISIS

En el transcurso de la prueba se obtuvieron datos de temperaturas de diferentes partes del combustor: Cámara de combustión, aislante, parrilla, y en la salida de gases. Los datos obtenidos se muestran en la Tabla 23.

En la tabla 23 se puede observar que la prueba dura 1 hora y 10 minutos, en los cuales se quema 402.63g de cáscara de *Jatropha Curca*, en la columna de observaciones se ubican los acontecimientos más relevantes de esta prueba.

Se determina que por cada vuelta que se le da a la manivela conectada al tornillo alimentador, esta transporta una masa de 2.3g de cáscara. En la Tabla 24, se muestran las máximas temperaturas registradas que alcanza el sistema durante la combustión.

Tabla 23. Datos de la quema de cáscara en el prototipo de quemador

HORA	TEMP. HOGAR	TEMP. AISLAMIENTO	TEMP. GASES	TEMP. PARRILLA	OBSERVACIONES
09:42	26	25.7		27	
09:45	240	25.3	130	28.6	
09:47	420	34.2	398	70.8	12 vueltas
09:48	343	46	390	125	9 vueltas
09:49	218	64.8	224	175	39 vueltas
09:56	321	65	240	211	13 vueltas
09:58	280	72	216	250	6 vueltas
09:59	330	60	233	250	4 vueltas
10:00	205	95	240	270	6 vueltas
10:08	620	52	390	202	Se acaba grano mediano
10:17					se agrega alcohol
10:19	530		162	128	19 vueltas
10:20	556	71.3	246	163	21 vueltas
10:25	335	132	250	271	4 vueltas
10:34	306	141	248	276	5 vueltas
10:39	353	145	230	249	6 vueltas
10:41	600	140	280	245	13 vueltas
10:43	620	154	320	264	8 vueltas
10:45	640	162.6	430	271	5 vueltas
10:46	620	163.2	474.4	274.3	10 vueltas
10:47	610	161.5	410	275.3	6 vueltas
10:50	610	154.5	350	292	12 vueltas
10:52	640	155.2	370	290.2	0 vueltas

Parte de la columna de observaciones se encuentra resaltada esto quiere decir, que a partir de ese momento se desconecta el ventilador del sistema, sólo en este lapso de tiempo fue posible tener una combustión apropiada y sostenida. Las máximas temperaturas registradas se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 24. Máximas temperaturas alcanzadas por el sistema

T HOGAR (°C)	T AISLAMIENTO (°C)	T GASES (°C)	T PARRILLA (°C)
640	163.2	474.4	292

Luego de quemar los 402.63g de cáscara de Jatropha Curca, se deja enfriar el sistema durante aproximadamente 1 hora. Luego de pasado este tiempo se retira la cámara de combustión del fondo del quemador y se remueven las cenizas. En la Ilustración 61, se muestran las cenizas obtenidas luego de la combustión, estas son retiradas de la parrilla y se ubican en papel aluminio y se llevan a la balanza digital donde se pesan. Se obtiene que la masa de las cenizas es de 68.09g con un volumen ocupado de 400ml, como se muestra en la Ilustración 62. Las cenizas corresponden al 17% de la muestra de cáscara utilizada.

Ilustración 61. Cenizas del sistema



Ilustración 62. Cenizas en el sistema



## 8 CONCLUSIONES

Se desarrolló un equipo que combina un método de quema de combustible sólido de lecho estacionario, que utiliza como combustible cáscara de *Jatropha Curca*, la cual es considerada un desperdicio en el proceso de obtención de biodiesel del albumen de esta semilla. Con el prototipo es posible obtener una combustión sostenida de la cáscara de *Jatropha Curca*, el cual es un proceso que presenta exigencias importantes, principalmente en cuanto a temperatura. El proceso de desarrollo consistió de la adquisición de conocimiento general sobre combustión, la identificación de propiedades del combustible, el diseño metódico, la construcción del prototipo y finalmente una breve evaluación experimental del prototipo resultante.

La cáscara de *Jatropha Curca* posee un poder calorífico de 17298 kJ/kg superior, el cual es valor alto para el caso de la biomasa, y más aún para la cáscara de *Jatropha Curca*, la cual como ya se ha mencionado antes es considerada un desperdicio en el proceso de obtención de biodiesel.

De los ensayos de caracterización se pudo concluir que la cáscara de *Jatropha* tiene una porosidad alta (89%), una baja densidad aparente (0.22 g/ml para el grano grande) y una humedad moderada (9-10%). La alta porosidad y la baja densidad aparente hacen que el combustible tenga poco empaquetamiento, requiriéndose una mayor cantidad de volumen para garantizar la alimentación de masa. También la porosidad favorece la absorción de humedad lo cual tiene efectos negativos para la combustión.

El porcentaje de cenizas para la cáscara de *Jatropha Curca* esta por el orden del 8%, el cual comparado con otras maderas es alto, las cenizas dificultan la combustión dentro de la cámara de combustión absorbiendo calor.



Se diseñó un prototipo de quemador de combustible sólido, el cual tiene una cámara de combustión de 16cm de diámetro y 20 cm de altura. Durante las pruebas realizadas se alcanzó una temperatura máxima de 640°C en el interior del hogar y de 474.4°C en los gases de combustión. El porcentaje de cenizas fue del 17%.

El prototipo se construyó en una lámina de acero recubierta por una capa de estaño, por la facilidad para su intervención y costo moderado. Se hicieron las respectivas consideraciones sobre las condiciones de operación y se concluyó que esta es una composición, técnicamente viable y económicamente favorable.

La construcción de la cámara de combustión, fondo, tornillo alimentador, camisa del tubo alimentador, buje de bronce y parrilla, está comprendida por: limpieza, ensamble y soldadura. Es un proceso con cierta complejidad que se realizó de una manera manual. Se invirtieron alrededor de 30h en la construcción total del prototipo de quemador, lo que representa una cantidad considerable de tiempo. Además los costos de los materiales para la realización de este prototipo alrededor de \$100.000 pesos.

En las pruebas de combustión atmosférica se pudo determinar que se necesita una temperatura superior o igual a los 450°C para que se dé una buena combustión de la cáscara. Por debajo de esta temperatura se presentan problemas y es probable que la llama se extinga. Esta condición exige que la cámara de combustión del prototipo de quemador se encuentre bien aislada, para poder alcanzar esta temperatura.

Después de los ensayos de quema de cáscara de *Jatropha Curca* utilizando la resistencia eléctrica, se pudo determinar que el tamaño de grano más apropiado para la combustión es el grande (mayor a 6.30mm), sosteniendo la llama por más tiempo y generando un menor porcentaje de cenizas alrededor del 20%. El grano

mediano (entre 4.75mm y 6.30mm) también presenta una combustión aceptable. El grano pequeño (entre 2.36mm y 4.75mm) y la muestra pulverizada (menor a 2.36) no generan llama. Esto puede explicarse porque a mayor tamaño del grano el combustible tiene más aireación.

Al realizar la prueba para determinar el porcentaje de humedad con los recursos de la Universidad EAFIT, se utiliza una muestra de cáscara de *Jatropha Curca*, después de este proceso, esta es quemada en el combustor de pruebas y se pudo observar que esta cáscara seca, se quema de una mejor manera que la cáscara sin ningún tratamiento previo.

En las pruebas se pudo determinar que al quemar la cáscara en el prototipo de quemador, no se requiere de ventilación forzada, cuando esta se desactiva la llama dentro de la cámara de combustión se comporta de una mejor manera, sosteniéndose solo con el aire arrastrado de manera natural.

Los procesos de diseño y construcción fueron realizados con cuidado y precaución. Sin embargo, el utilizar la cáscara de *Jatropha Curca* como combustible es un tema en desarrollo y aún existen muchos aspectos por determinar; por lo cual el diseño y optimización aún está muy atado a la experimentación.

## 9 RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Mejorar el proceso de construcción del quemador para así reducir tiempo, costos y garantizar un correcto desempeño de este. También se debe considerar el cambio de materiales que garanticen una mayor durabilidad.

Evaluar y desarrollar otras alternativas para la alimentación del sistema como: plano inclinado, plataforma movediza, tolvas. Criterios importantes para esta evaluación son: la durabilidad en el tiempo y la facilidad de instalación.

Realizar pruebas de larga duración en el prototipo para establecer su respuesta en condiciones normales de operación y tener noción del deterioro que sufren los materiales del cual está fabricado. También se deben realizar pruebas de operación adicionales en las que se midan otras variables, como la composición de los gases de combustión.

Evaluar alternativas de aglomerar y/o compactar el combustible, ya que este sistema necesita de una alimentación constante de cáscara, debido a su baja densidad aparente y a su alta porosidad.

No triturar la cáscara de *Jatropha Curca*, ya que de resultados obtenidos se demostró que la mejor combustión ocurre cuando la cáscara posee un mayor tamaño de grano.

En el prototipo de quemador se observa que las cenizas se quedan almacenadas en la parrilla de combustión, entonces se debe hacer una parrilla cóncava y de menor diámetro, y así poder evacuar más rápidamente las cenizas.

Se sugiere seguir con la investigación y mejoramiento del prototipo de quemador para próximos estudios de combustibles de biomasa.

La cáscara de *Jatropha Curca* se puede utilizar como combustible para generar energía calórica para calderas y climatizadores, ya que posee un alto poder calorífico, es de fácil adquisición y no genera mayor porcentaje de CO<sub>2</sub>.

Utilizar las cenizas, ya que estas poseen componentes que pueden ser útiles para el suelo.

## BIBLIOGRAFÍA

- acaceres. (s.f.). *acaceres*. Recuperado el 23 de Octubre de 2012, de [http://www.acaceres.addr.com/student\\_access/madera.pdf](http://www.acaceres.addr.com/student_access/madera.pdf)
- ambientum. (2012). *ambientum*. Recuperado el 24 de Octubre de 2012, de [http://www.ambientum.com/enciclopedia\\_medioambiental/suelos/relacion\\_c\\_arbono\\_nitrogeno.asp](http://www.ambientum.com/enciclopedia_medioambiental/suelos/relacion_c_arbono_nitrogeno.asp)
- Ayala carcedo, F. y. (2006). *Manual de Ingenierías de Taludes*. Madrid.
- Cengel, Y. A., & Boles, M. (2009). *Termodinámica, Sexta Edición*. México: McGraw - Hill.
- construmatica. (s.f.). *construmatica*. Recuperado el 31 de Octubre de 2012, de [http://www.construmatica.com/construpedia/Densidad\\_Aparente](http://www.construmatica.com/construpedia/Densidad_Aparente)
- directindustry. (2012). *directindustry*. Recuperado el 31 de Octubre de 2012, de <http://www.directindustry.es/prod/greco-combustion-systems-europe/quemadores-de-combustibles-solidos-pulverizados-66925-651853.html>
- Directorios Industriales. (s.f.). Recuperado el 3 de Mayo de 2012, de [http://www.dirind.com/dim/monografia.php?cla\\_id=75](http://www.dirind.com/dim/monografia.php?cla_id=75)
- geocities. (s.f.). *geocities*. Recuperado el 24 de Octubre de 2012, de [http://www.geocities.ws/todolostrabajossallos/orgal\\_8.pdf](http://www.geocities.ws/todolostrabajossallos/orgal_8.pdf)
- González-Mena, J., Reimers-Reyes, A., & Pérez-Bejarano, J. (2010). *ANALISIS BROMATOLOGICO PARA LA DETERMINACION DE LA CALIDAD DEL PESCADO ENLATADO EN ACEITE*. Guanajuato.
- Grisales, D. K., Ortega, L. J., Blanco, S. A., & Rodríguez, T. (2012). *Manual para el análisis aguas residuales*. Bogotá.
- ICONTEC. (1996). *NTC 955*. Bogotá.
- ICONTEC. (2004). *NTC 5167: Productos para la industria agrícola. Productos orgánicos usados como abonos o fertilizantes y enmiendas de suelo*. Bogotá.

- Kratzeisen, M., & Müller, J. (2013). Suitability of Jatropha seed shells as fuel for small-scale combustion unit. *Renewable Energy*, 51, 46-52.
- lacomunidadpetrolera. (2012). *lacomunidadpetrolera*. Recuperado el 24 de Octubre de 2012, de <http://www.lacomunidadpetrolera.com/cursos/propiedades-de-la-roca-yacimiento/definicion-de-la-porosidad.php>
- Oficios Técnicos. (3 de Mayo de 2012). Obtenido de <http://www.tecnoficio.com/docs/doc48.php>
- Santiago, R. B. (2008). *Composición química de la madera de cinco especies de pino del municipio de Morelia, Michoacan, Mexico*. Morelia.
- Scribd Clasificación de los quemadores. (s.f.). *Scribd*. Recuperado el 3 de Mayo de 2012, de <http://es.scribd.com/doc/53903277/60/Clasificacion-delos->
- Scribd Quemadores atmosfericos. (Octubre de 1997). Recuperado el 3 de Mayo de 2012, de <http://es.scribd.com/doc/73707395/3-Quemadores-Atmosfericos-1>
- Scribd Quemadores de pulverización mecánica. (s.f.). Recuperado el 3 de Mayo de 2012, de <http://es.scribd.com/doc/18360134/45/QUEMADORES-DEPULVERIZACION->
- Sermate. (s.f.). *Sermate*. Recuperado el 3 de Mayo de 2012, de <http://www.sermate.com/quemadores/tipodequemador/quemadoresatmosfericos/index.html>
- Sermate. (s.f.). *Sermate*. Recuperado el 3 de Mayo de 2012, de <http://www.sermate.com/quemadores/tipodequemador/quemadoresdepmezcla/index.html>
- Shield, C. (1982). *Calderas: Tipos, características y sus funciones*. México: Compañía Editorial Continental S.A.
- slideshare. (2012). *slideshare*. Recuperado el 23 de Octubre de 2012, de <http://www.slideshare.net/lrveen/contenido-de-humedad-y-analisis-granulometrico>

Subero Pérez, E. (2010). *CARACTERIZACIÓN DE LOS COMBUSTIBLES SÓLIDOS*.

Testo. (2004). *Manual práctico Tecnología de medición en calderas*.

thelondonprideproject. (2011). *thelondonprideproject*. Recuperado el 29 de Octubre de 2012, de <http://thelondonprideproject.blogspot.com/2011/04/segunda-produccion.html>

ucn. (2010). *ucn*. Recuperado el 24 de Octubre de 2012, de <http://www3.ucn.cl/FacultadesInstitutos/laboratorio/Propiedades%20f%EDsicasm3.htm>

un. (2002). *un*. Recuperado el 24 de Mayo de 2012, de [http://www.un.org/spanish/conferences/wssd/energia\\_ni.htm](http://www.un.org/spanish/conferences/wssd/energia_ni.htm)

unalmed. (2012). *unalmed*. Recuperado el 24 de Octubre de 2012, de [http://www.unalmed.edu.co/~ctcarbon/an%E1lisis\\_de\\_cenizas.htm#EI%20P205](http://www.unalmed.edu.co/~ctcarbon/an%E1lisis_de_cenizas.htm#EI%20P205)

unalmed. (s.f.). *unalmed*. Recuperado el 24 de Octubre de 2012, de [http://www.unalmed.edu.co/~ctcarbon/an%E1lisis\\_de\\_cenizas.htm#EI%20P205](http://www.unalmed.edu.co/~ctcarbon/an%E1lisis_de_cenizas.htm#EI%20P205)

unilibresoc. (s.f.). *unilibresoc*. Recuperado el 23 de Octubre de 2012, de <http://www.unilibresoc.edu.co/mecsuelos/htm/cap4/41.htm>

Universidad EAFIT. (s.f.). *MEDICIÓN DE DENSIDAD APARENTE DE MATERIALES PLÁSTICOS*. Medellín.

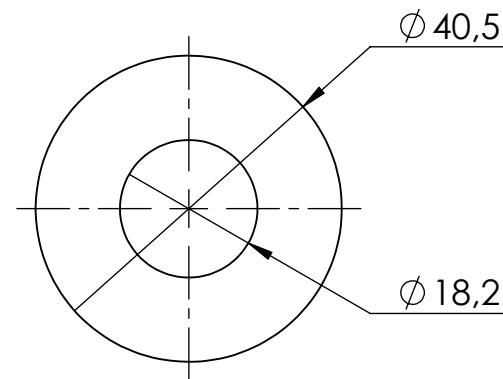
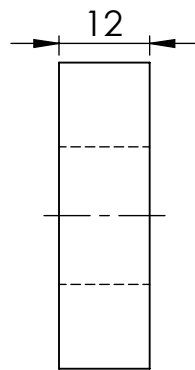
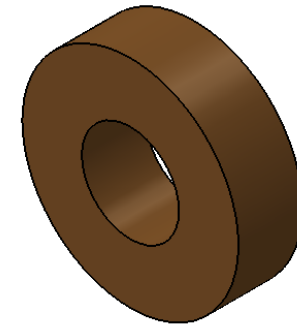
Universidad Nacional Autónoma de México. (Diciembre de 2008). *Geociencias*. Recuperado el 3 de Mayo de 2012, de <http://www.geociencias.unam.mx/~bole/eboletin/treRebecaLM09.pdf>

webdelprofesor. (s.f.). *webdelprofesor*. Recuperado el 1 de Noviembre de 2012, de [http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/marquezronald/wp-content/uploads/An\\_341lisis-Laboratorio.pdf](http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/marquezronald/wp-content/uploads/An_341lisis-Laboratorio.pdf)

## 10 ANEXOS

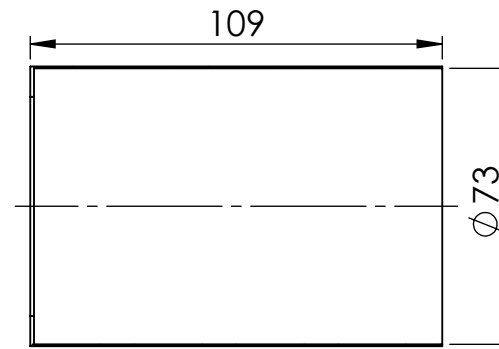
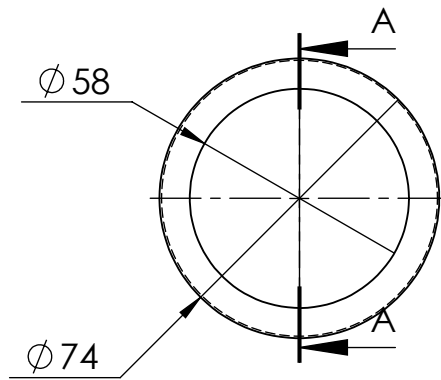
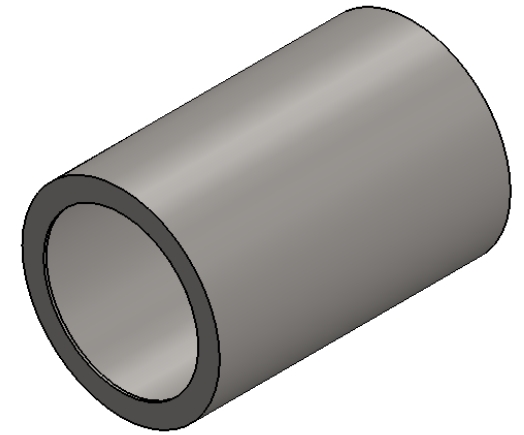
Planos de construcción del prototipo.





Cr 49 7Sur-50  
Avenida Las Vegas  
Medellin, COLOMBIA  
Telefono: +(57)(4) 261-95-00

PROYECTO Prototipo de quemador de cáscara de Jatropha Curca		
DIBUJO Daniel Jaramillo Restrepo		
PIEZA BUJE		
ESCALA 1:1	UNIDADES mm	FORMATO A4
CANTIDAD 1	MATERIAL Bronce	PLANO 1/10

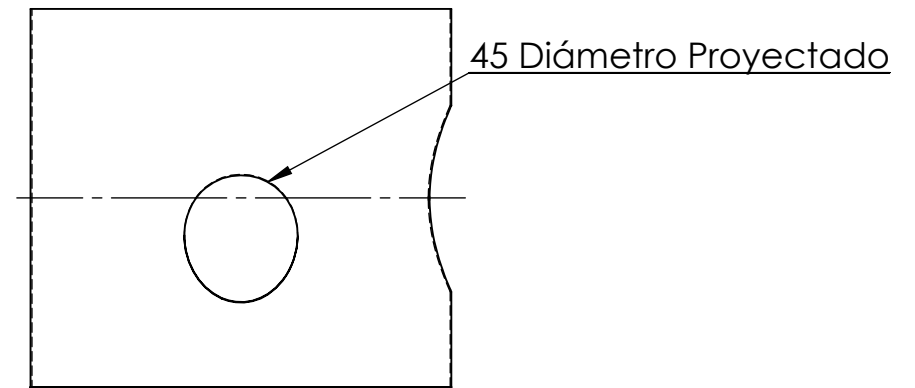
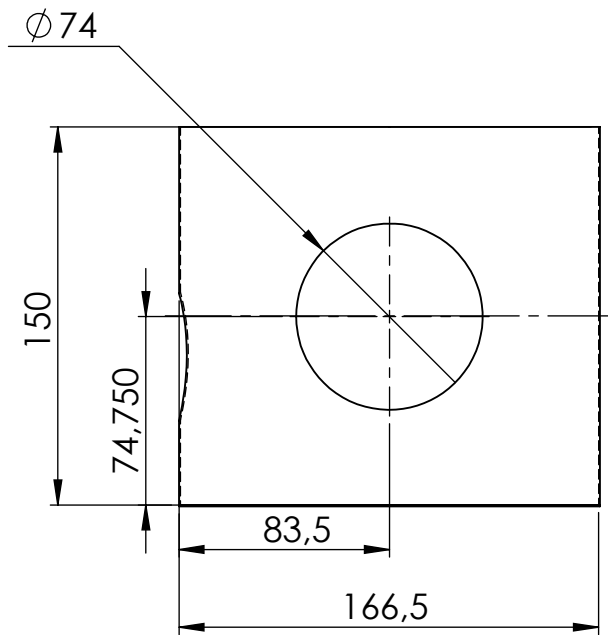
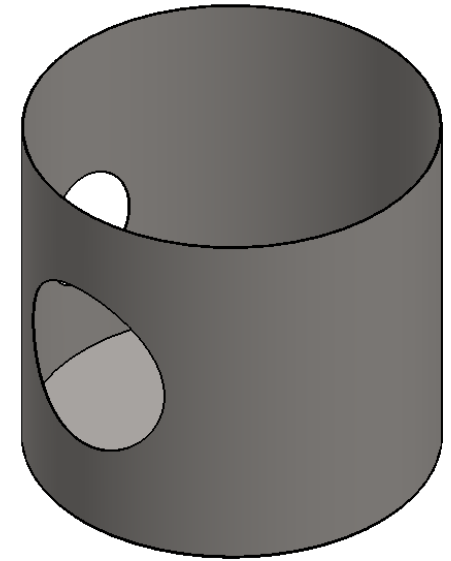


SECCIÓN A-A



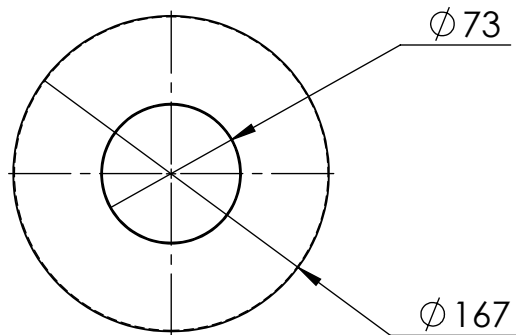
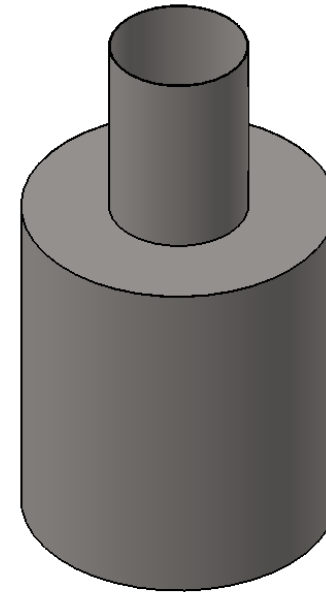
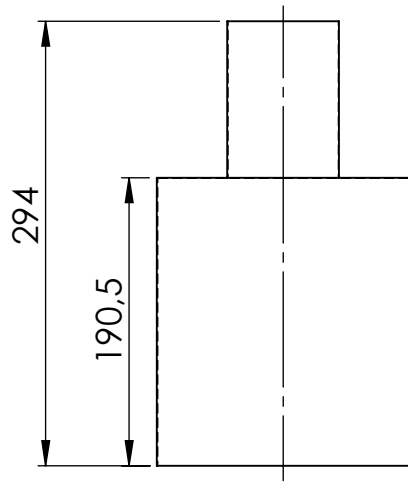
Cr 49 7Sur-50  
Avenida Las Vegas  
Medellin, COLOMBIA  
Telefono: +(57)(4) 261-95-00


PROYECTO Prototipo de quemador de cáscara de Jatropha Curca		
DIBUJO Daniel Jaramillo Restrepo		
PIEZA CONDUCTO DE VENTILACIÓN		
ESCALA 1:2	UNIDADES mm	FORMATO A4
CANTIDAD 1	MATERIAL Acero	PLANO 2/10

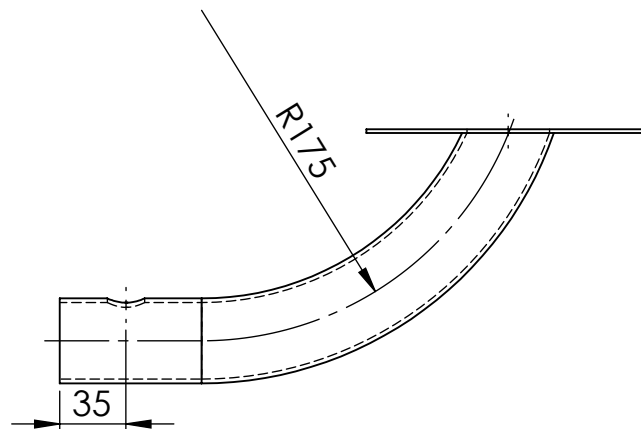
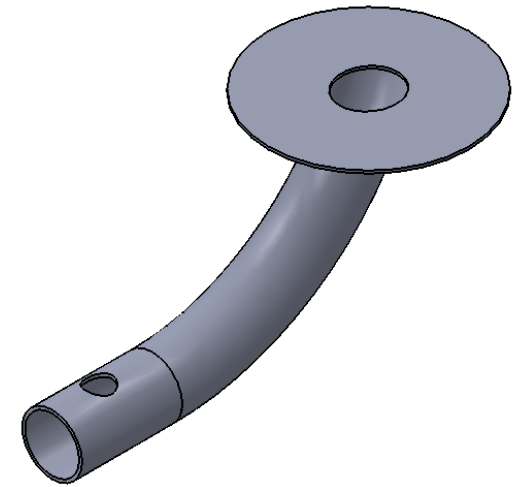
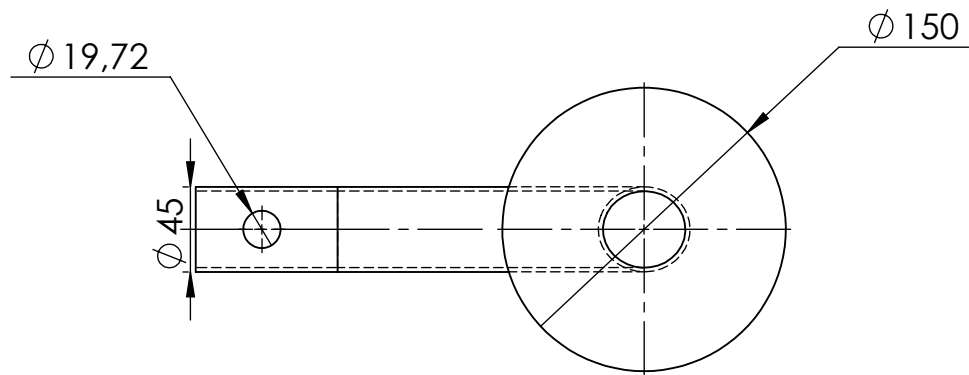


Cr 49 7Sur-50  
Avenida Las Vegas  
Medellin, COLOMBIA  
Telefono: +(57)(4) 261-95-00

PROYECTO Prototipo de quemador de cáscara de Jatropha Curca		
DIBUJO Daniel Jaramillo Restrepo		
PIEZA RECIPIENTE CENIZAS		
ESCALA 1:5	UNIDADES mm	FORMATO A4
CANTIDAD 1	MATERIAL Acero	PLANO 3/12

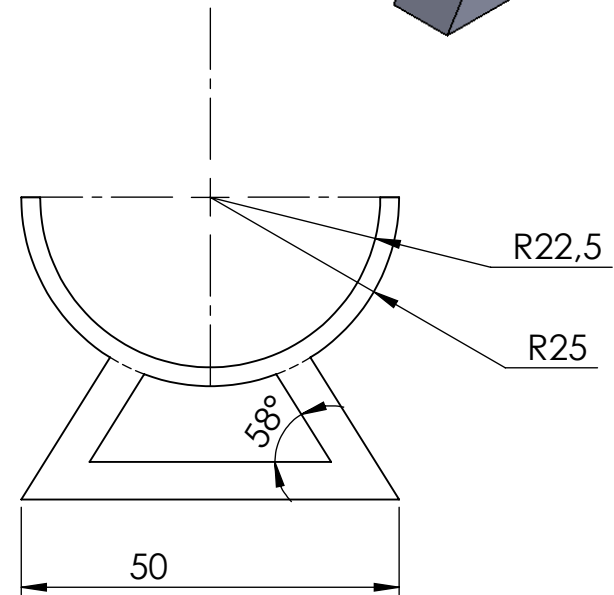
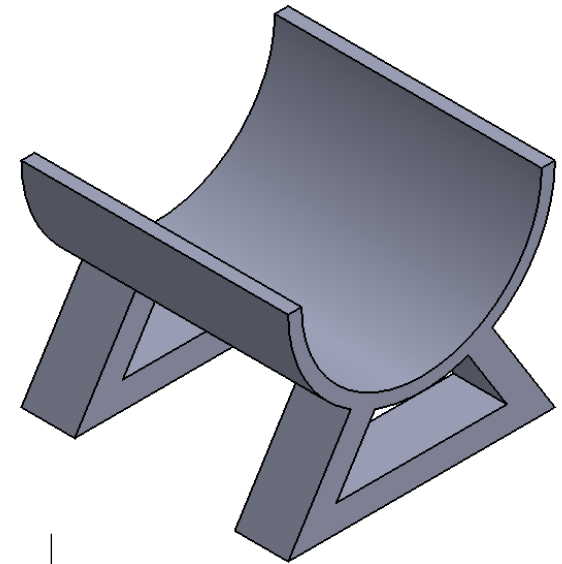
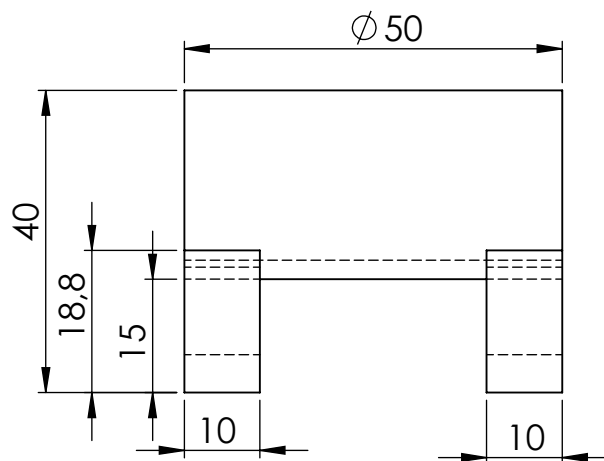


 <p><b>UNIVERSIDAD EAFIT</b> Abierta al Mundo</p> <p>Cr 49 7Sur-50 Avenida Las Vegas Medellin, COLOMBIA Telefono: +(57)(4) 261-95-00</p>	<b>PROYECTO</b> Prototipo de quemador de cáscara de Jatropha Curca		
	<b>DIBUJO</b> Daniel Jaramillo Restrepo		
	<b>PIEZA</b> Hogar		
	<b>ESCALA</b> 1:5	<b>UNIDADES</b> mm	<b>FORMATO</b> A4
<b>CANTIDAD</b> 1	<b>MATERIAL</b> Acero 1020	<b>PLANO</b> 4/10	



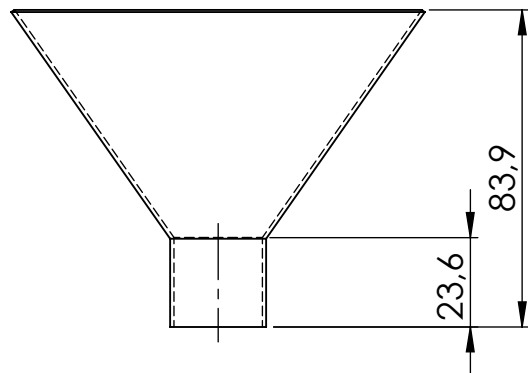
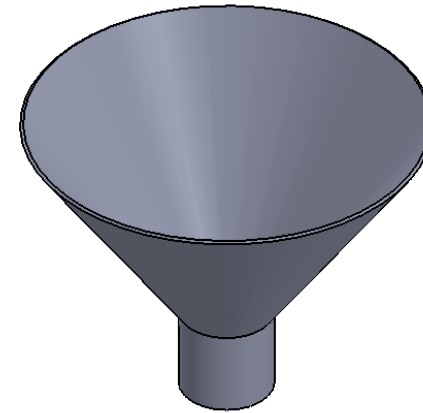
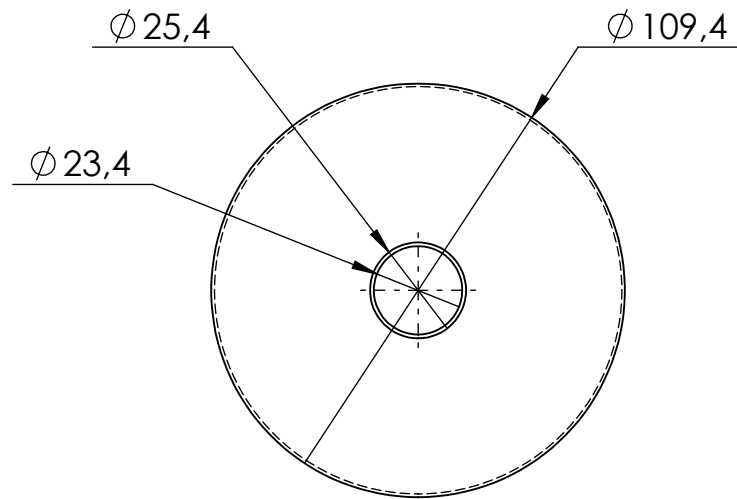
Cr 49 7Sur-50  
Avenida Las Vegas  
Medellin, COLOMBIA  
Telefono: +(57)(4) 261-95-00

PROYECTO		
Prototipo de quemador de cáscara de Jatropha Curca		
DIBUJO		
Daniel Jaramillo Restrepo		
PIEZA		
Parrilla		
ESCALA	UNIDADES	FORMATO
1:5	mm	A4
CANTIDAD	MATERIAL	PLANO
1	Acero 1020	5/10



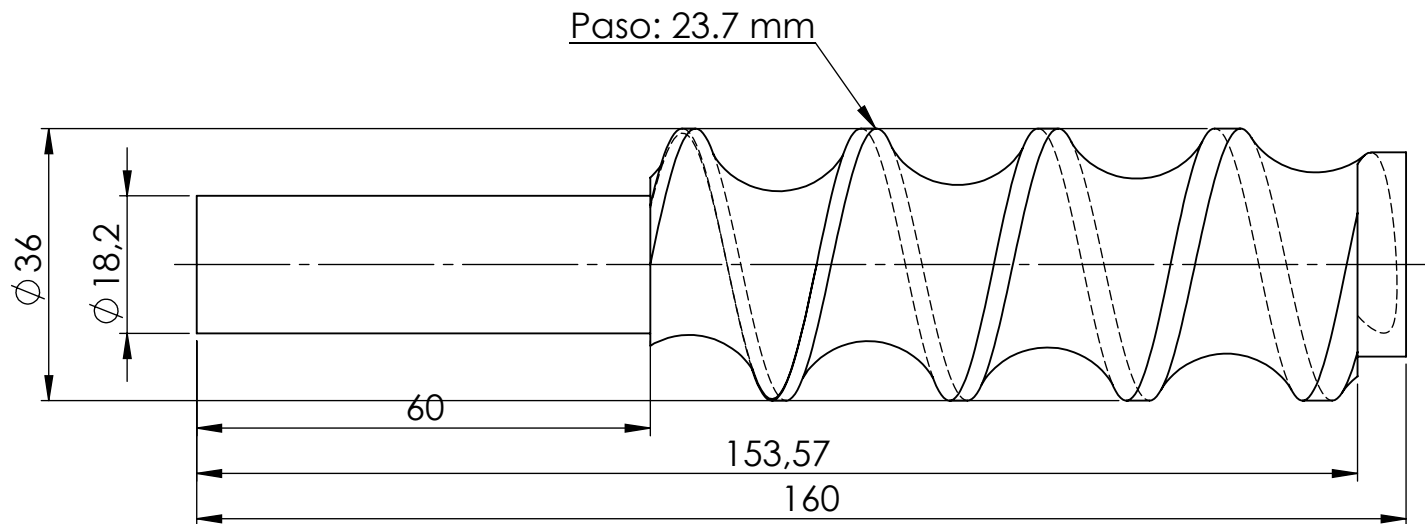
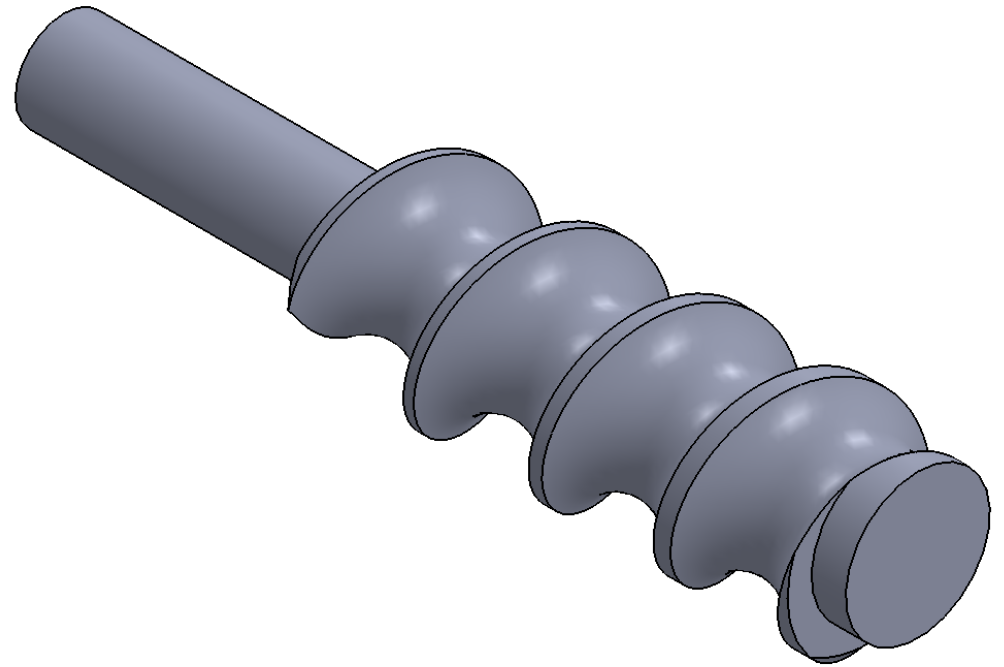
Cr 49 7Sur-50  
Avenida Las Vegas  
Medellin, COLOMBIA  
Telefono: +(57)(4) 261-95-00

PROYECTO Prototipo de quemador de cáscara de Jatropha Curca		
DIBUJO Daniel Jaramillo Restrepo		
PIEZA Soporte		
ESCALA 1:1	UNIDADES mm	FORMATO A4
CANTIDAD 1	MATERIAL Acero 1020	PLANO 6/10



Cr 49 7Sur-50  
Avenida Las Vegas  
Medellin, COLOMBIA  
Telefono: +(57)(4) 261-95-00

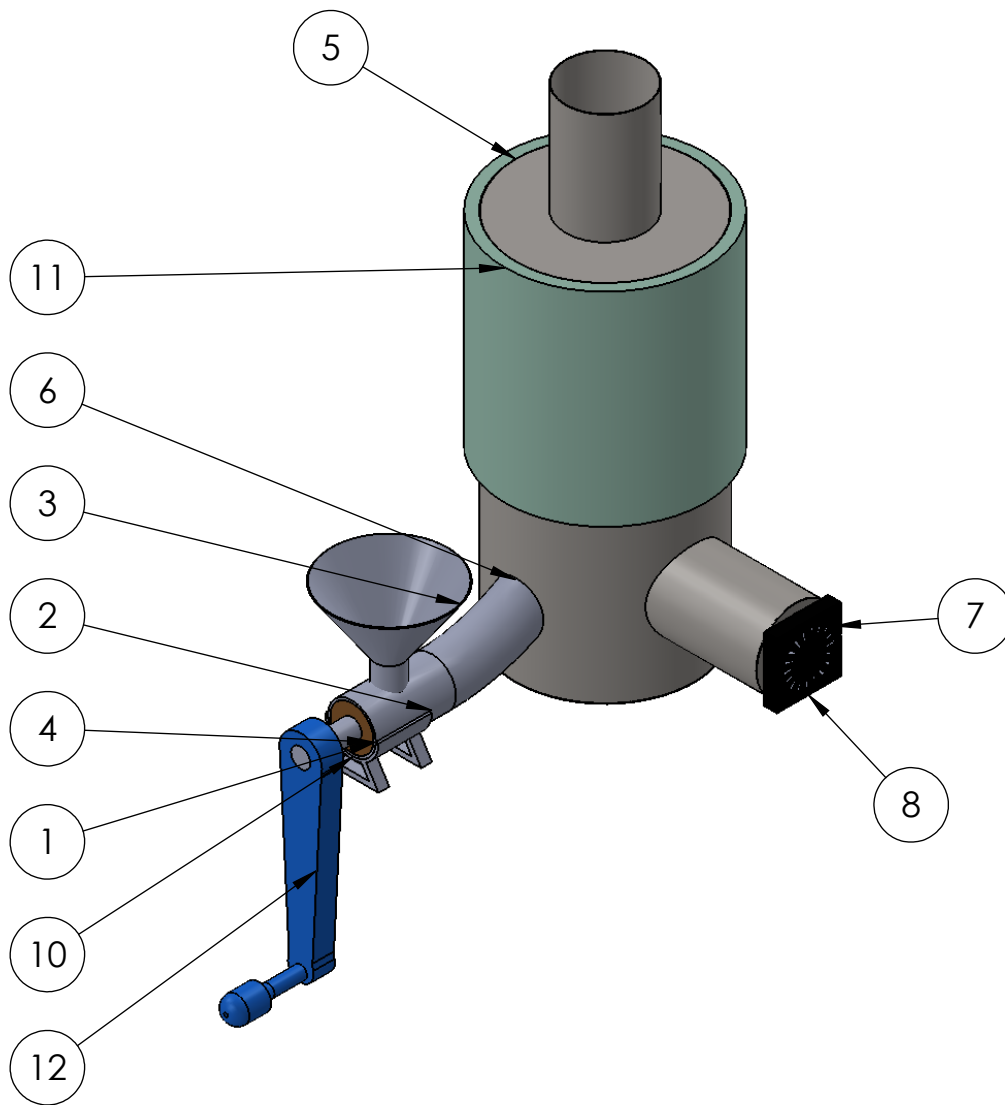
PROYECTO Prototipo de quemador de cáscara de Jatropha Curca		
DIBUJO Daniel Jaramillo Restrepo		
PIEZA Tolva		
ESCALA 1:2	UNIDADES mm	FORMATO A4
CANTIDAD 1	MATERIAL Acero 1020	PLANO 7/10



Cr 49 7Sur-50  
Avenida Las Vegas  
Medellin, COLOMBIA  
Telefono: +(57)(4) 261-95-00

PROYECTO Prototipo de quemador con cáscara de Jatropha Curca		
DIBUJO Daniel Jaramillo Restrepo		
PIEZA Tornillo de Transporte		
ESCALA 1:2	UNIDADES mm	FORMATO A4
CANTIDAD 1	MATERIAL Acero 1020	PLANO 8/10





N.º	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
1	Parrilla	1
2	Tornillo	1
3	Tolva	1
4	Buje	1
5	hogar	1
6	Fondo	1
7	Ducto_Ventilador	1
8	Ventilador	1
9	Ducto_Ignición	1
10	Soporte tubo	1
11	Recubrimiento Térmico	1
12	MANIVELA	1



Cr 49 7Sur-50  
Avenida Las Vegas  
Medellin, COLOMBIA  
Telefono: +(57)(4) 261-95-00

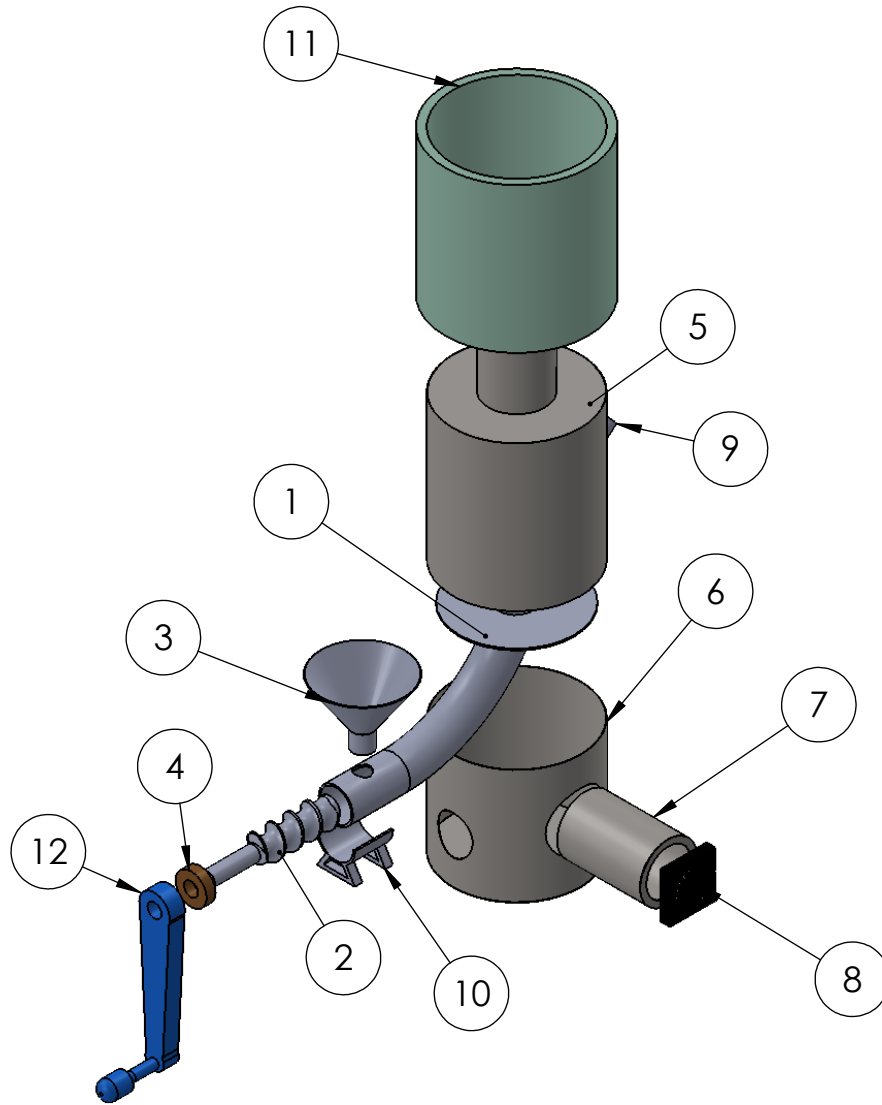
PROYECTO  
Prototipo de quemador de cáscara de Jatropha Curca

DIBUJO  
Daniel Jaramillo Restrepo

PIEZA  
Ensamble

ESCALA 1:10	UNIDADES mm	FORMATO A4
----------------	----------------	---------------

CANTIDAD 1	MATERIAL	PLANO 9/10
---------------	----------	---------------



N.º	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
1	Parrilla	1
2	Tornillo	1
3	Tolva	1
4	Buje	1
5	hogar	1
6	Fondo	1
7	Ducto_Ventilado r	1
8	Ventilador	1
9	Ducto_Ignición	1
10	Soporte tubo	1
11	Recubrimiento Térmico	1
12	MANIVELA	1



Cr 49 7Sur-50  
Avenida Las Vegas  
Medellin, COLOMBIA  
Telefono: +(57)(4) 261-95-00

PROYECTO  
Prototipo de quemador con cáscara de Jatropha Curca

DIBUJO  
Daniel Jaramillo Restrepo

PIEZA  
Ensamble en Explosión

ESCALA 1:10	UNIDADES mm	FORMATO A4
----------------	----------------	---------------

CANTIDAD 1	MATERIAL	PLANO 10/10
---------------	----------	----------------