

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ

Diseño de un gasificador de 25 kW para aplicaciones domésticas usando como combustible cascarilla de arroz

Tesis para optar el Título de **Ingeniero Mecánico**, que presenta el bachiller:

Carlos Yi Huaraz Choi

ASESOR: Ing. Estela Assureira Espinoza

Lima, Abril del 2013



© 2013, Carlos Yi Huaraz Choi

Se autoriza la reproducción total o parcial,
con fines académicos a través de cualquier
medio o procedimiento, incluyendo la cita
bibliográfica del documento.



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA

TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

TÍTULO : Diseño de un gasificador de 25 kW para aplicaciones domésticas usando como combustible cascarilla de arroz

ÁREA : Energía # 316

PROPUESTO POR : Ing. Estela Assureira Espinoza

ASESOR : Ing. Estela Assureira Espinoza

TESISTA : Carlos Huaraz Choi

CÓDIGO : 20047089

FECHA : 24 de octubre del 2012



DESCRIPCIÓN Y OBJETIVOS:

Las estadísticas del Ministerio de Agricultura muestran que en nuestro país se producen alrededor de 2'600,000 TM/año de arroz cáscara, concentrándose esta producción en los departamentos de Piura, Lambayeque y La Libertad. El residuo más significativo es la cascarilla la cual representa el 22% del arroz cáscara, la cual en su mayoría es incinerada para la producción artesanal de pulitón o bótada a los ríos contaminando el medio ambiente.

Las investigaciones realizadas por el Grupo de Investigación Carbón Biomasa de la PUCP sobre el aprovechamiento energético de este residuo indican que existen excelentes oportunidades para la generación de calor por combustión, pirólisis y gasificación siendo este último proceso el que presenta mayores oportunidades de aplicación del gas generado en procesos de cocción de alimentos, secado y producción de vapor entre otros.

Se propone como trabajo el diseño de un gasificador de 25 kW para su empleo en procesos de cocción. El trabajo propuesto abarcará el desarrollo de las consideraciones para la selección del gasificador, el diseño del sistema de generación de gas pobre y la selección del quemador.



TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

**DISEÑO DE UN GASIFICADOR DE 25 KW PARA APLICACIONES
DOMÉSTICAS USANDO COMO COMBUSTIBLE CASCARILLA DE ARROZ**

Introducción

1. La cascarilla de arroz alternativa energética
2. Principios de funcionamiento de un gasificador
3. Criterios para la selección del gasificador
4. Diseño energético y mecánico la unidad de generación de gas
5. Diseño de la unidad de empleo de gas generado
6. Costo del sistema.

Planos

Observaciones y Recomendaciones

Conclusiones

Bibliografía

Anexos

Máximo: 100 páginas


Ing. Estela Assureira Espinoza
Asesora

RESUMEN

El trabajo desarrollado presenta una propuesta de aprovechamiento de la cascarilla de arroz para la cocción de alimentos, a través de un proceso de gasificación. Se escogió la cascarilla de arroz por el gran potencial que existe en el Perú que no es aprovechada, y se consideró su gasificación pues el gas pobre (compuesto mayormente por monóxido de carbono, metano, dióxido de carbono) se puede aplicar para procesos de calefacción, deshidratación o cocción, este último será el desarrollado en el presente trabajo.

En la tesis desarrollada abarca el análisis del gasificador Downdraft, ya que por la potencia que se necesita y tipo de combustible es el más utilizado para los procesos de cocción, luego se realiza el diseño de equipo que comprende: la unidad generadora de gas (gasificador), el intercambiador de calor y ciclón, la selección del quemador y un análisis del costo del equipo.

Las características del gasificador son las siguientes: 25 kW de potencia, eficiencia del 60%, un diámetro de 0,30 m, temperatura máxima dentro del reactor de 600°C y temperatura externa de 35 °C, altura de 1,40 m, diámetro de 0,35 m y 0,105 m³ de capacidad de almacenamiento, además utiliza 11,60 kg de cascarilla de arroz por batch; para la generación del gas es necesario una relación de aire-combustible de 1,80 kg. de aire por cada kg. de combustible, para realizar esto se coloca un ventilador de 10 W y un caudal de aire de 33 CFM (56,1 m³/h).

Se propone la compra de un intercambiador de calor tipo coraza y tubos de un paso para disminuir la temperatura del gas desde 600 °C hasta los 200 °C, utiliza agua como refrigerante, el diámetro del casco es de 100 mm, un largo de 0,25 m y se compondrá de 18 tubos, además el intercambiador utiliza un flujo de agua de 0,033 l/s; también se utiliza un ciclón para la limpieza del contenido de partículas que contiene el gas, las dimensiones del ciclón son de 0,85 m de altura y 0,25 m de diámetro y tendrá una eficiencia del 100% para partículas de 25 µm.

Se propone como quemador los empleados en las cocinas de gas licuado de petróleo o gas natural (quemadores atmosféricos), estos tienen un diámetro de 180 mm y una capacidad de 14 kW (12 000 kcal/h). Adicionalmente se presenta un esquema simple de un quemador basándose en el principio de los quemadores atmosféricos, este tiene la forma de un cilindro de diámetro de 220 mm, 80 agujeros en la parte superior y 6 agujeros en la parte lateral de 12 mm de diámetro, y una altura de 130 mm. Este esquema se realizó con la finalidad, de que; si se realiza el diseño en futuros proyectos similares, haya la posibilidad de implementarse al equipo diseñado en este proyecto.

El costo de fabricación del equipo (unidad generadora de gas, intercambiador de calor, ciclón y accesorios) es de aproximadamente S/. 12 570, este costo incluye los materiales, equipos, mano de obra y costo de ingeniería.

DEDICATORIA



A mis padres
y hermano

ÍNDICE

Resumen	i
Dedicatoria	ii
Lista de símbolos.....	v
Introducción	1
Capítulo 1: La cascarilla de arroz alternativa energética	4
1.1 Residuos generados en el procesamiento del arroz.....	4
1.2 Propiedades bioquímicas de la cascarilla de arroz.....	6
1.3 Propiedades físicas de la cascarilla de arroz	7
1.4 Propiedades químicas de la cascarilla de arroz	13
1.5 Punto de fusión de la ceniza de la cascarilla de arroz.....	15
Cápítulo 2 : Principios de funcionamiento de un gasificador	18
2.1 Estado de la tecnología.....	18
2.2 El proceso de la Gasificación.....	20
2.3 Tipo de gasificadores.....	21
2.4 Ventajas y desventajas de los diferentes gasificadores.....	26
Cápítulo 3: Criterios para la selección del gasificador	30
3.1 Modelo conceptual.....	30
3.2 Criterios de la selección del gasificador	35
Capítulo 4: Diseño energético y mecánico la unidad de generación de gas.....	38
4.1. Partes del equipo	38
4.2. Aire requerido para el proceso de gasificación.....	39
4.3. Procedimiento para el diseño del gasificador	41
4.4. Consideraciones para el gas de salida.....	56
4.5. Soporte del gasificador	60
Capítulo 5: Diseño de la unidad de empleo de gas generado	656
5.1. Equipos de limpieza y depuración de gases	66
5.2. Intercambiador de Calor.....	71
5.3 Quemadores.....	76
5.4 Comparación de combustibles (GN, GLP Y Gas pobre).....	82
5.5 Quemador para el gas pobre	85

Cápítulo 6: Costo del sistema	90
6.1. Costo de suministro	90
6.2. Costo de fabricacion e instalación.....	92
6.3 Rentabilidad del proyecto.....	97
Conclusiones y recomendaciones.....	99
Bibliografía.....	102
Planos	
Anexos	



LISTA DE SÍMBOLOS

A_1	Aislante térmico (mm)
A_2	Plancha metálica (mm)
A_c	Área de la sección transversal del perfil (cm^2)
A_e	Aire estequiométrico
Q_a	Flujo de aire (m^3/h)
B	Largo del ducto de entrada al ciclón (m^2)
C_d	Coefficiente de arrastre
D_p	Diámetro de la partícula (μm)
D_g	Diámetro del gasificador (m)
E	Eficiencia de la soldadura
g	Gravedad ($9.81 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$)
H	Altura del reactor (m)
$h_{c.a}$	Coefficiente convectivo del aire ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{k}^{-1}$)
$h_{c.g}$	Coefficiente convectivo del gas ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{k}^{-1}$)
I_n	Radio de giro del perfil (cm)
I_x	Momento de Inercia (cm^2)
K_a	Conductividad térmica del aislante ($\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$)
K_t	Conductividad térmica de la plancha metálica ($\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$)
L	Longitud del gasificador (m)
L_p	Longitud del perfil (cm)
\dot{m}_c	Flujo másico del combustible (kg/h)
\dot{m}_g	Flujo másico del gas (kg/h)
η	Eficiencia del gasificador
N	Número de vueltas dadas por el gas en el interior del ciclón
V	Velocidad de entrada del gas al ciclón (m/s)
μ_1	Viscosidad del gas ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$)
P	Presión Interna del reactor (bar)
P_c	Poder calorífico del combustible (kcal/kg)
Q	Calor transferido total (kW)
Q_n	Potencia del gasificador (kW)
r_e	Radio externo de gasificador (mm)

r_{i1}	Radio interno del gasificador (mm)
r_{i2}	Radio externo del aislante (mm)
S	Esfuerzo máximo permitido (bar)
S _{gr}	Relación específica para la gasificación de la cascarilla de arroz (kg/m ² -h)
T	Tiempo requerido para el consumo del combustible (h)
T _{e,p}	Espesor del reactor (mm)
T _{ooe}	Temperatura del medio ambiente (°C)
T _{ooi}	Temperatura interna del gasificador (°C)
T _{pe}	Temperatura de la pared externa del gasificador (°C)
T _{pi}	Temperatura de la pared interna (°C)
V _t	Velocidad terminal de la partícula (m.s ⁻¹)

Símbolos griegos

ρ_g	Densidad del gas (kg/m ³)
ρ_s	Densidad de la cascarilla de arroz (kg/m ³)
ρ_a	Densidad del aire (kg/m ³)
Φ	Relación de equivalencia
σ_c	Esfuerzo de compresión (kgf/cm ²)
σ_{Fadm}	Esfuerzo de fluencia admisible (kgf/mm ²)





INTRODUCCIÓN

El proceso de gasificación para la producción de gas pobre tiene una alta demanda en los países europeos como fuente de energía. Este proceso de la gasificación es una tecnología antigua que fue descubierto a principios de los años 1800, el uso de esta tecnología ha sido tomado en cuenta como una alternativa energética en los últimos 40 años.

El proceso de gasificación era bastante ordinario y el combustible más frecuente era el carbón, entre los años de 1850 a 1940 el gas producido era utilizado para la iluminación y calefacción. Hasta el desarrollo de líneas de suministro y transmisión de gas natural entre 1940 y 1950 se producía a partir de la gasificación del carbón. Al comienzo de la segunda guerra mundial por la restricción de suministro de petróleo en Dinamarca, el 95% de los automóviles (tractores, coches, camiones, barcos, etc.) utilizaban el gas producido por el proceso de gasificación, usando madera o carbón como combustible, también los ingenieros alemanes utilizaron este proceso para producir combustibles sintéticos entre 1920 y 1940.

Entre 1975 y 1990 hubo una gran evolución en el proceso de la gasificación que se inició después del embargo de petróleo Árabe de 1973. Por este acontecimiento y a la consiguiente crisis energética hubo un interés renovado en todas las formas de energía alternativas, incluido el gas producido por el carbón y biomasa, la mayor parte de los primeros trabajos fue con el apoyo de los Estados Unidos y establecimientos extranjeros de energía y se centró en los gasificadores de alimentación a gran escala de carbón que estaban destinados a producir gas natural como combustible.

Hubo poco en la gasificación de biomasa, con excepción de los grupos interesados en los usos en los países menos desarrollados y los proyectos particulares, estos grupos y proyectos tenían la finalidad de ayudar a la gente construyendo gasificadores de baja potencia y bajo costo, para aplicaciones domésticas, estos tipos de gasificadores fueron mejorando con los años al usar como combustible, ya no solo madera o carbón, sino las grandes cantidades de residuos agrícolas generados en los países menos desarrollados.

En el Perú se genera una gran cantidad de residuos agrícolas como por ejemplo la cascarilla de arroz que en el año 2012 se generó aproximadamente 599 800 TM (Toneladas métricas), de esta cantidad tan sólo el 5% es usado en procesos de secado para ladrillos en el departamento de Piura, lo demás es quemado o tirado a los ríos, esto genera una gran contaminación al medio ambiente.

Las investigaciones realizadas por el Grupo de Investigación Carbón –Biomasa de la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP) sobre el aprovechamiento energético de la cascarilla de arroz indican que existen muy buenas oportunidades para la generación de calor por medio de la gasificación donde se podría aplicar en procesos de cocción de alimentos, secado y producción de vapor entre otros, entonces si se pudiera fabricar un equipo para procesos de cocción de alimentos que utilice el proceso de la gasificación y que además use como combustible las grandes cantidades de cascarilla de arroz que se genera anualmente, este proceso y este tipo de residuo agrícola podrían ser una gran alternativa energética en el Perú. Además esto podría incentivar otros proyectos que pueden usar otros tipos de residuos agrícolas como combustible como la cascarilla de café, brozas de algodón o cáscara de cocos, también se podría desarrollar equipos que usen varios combustibles.

Para diseñar el equipo generador de gas, se ha dividido en seis capítulos, el primero presenta las propiedades físicas, químicas y bioquímicas del combustible a usar.

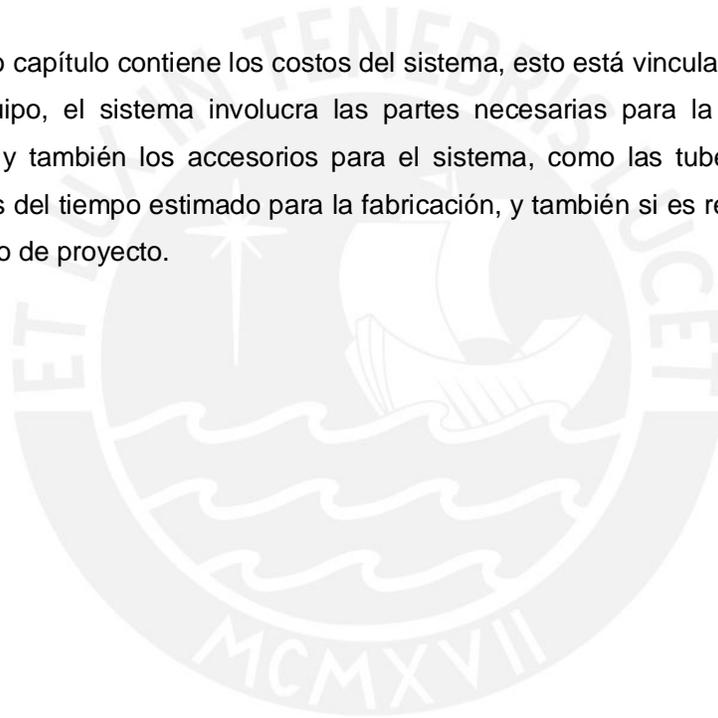
El segundo trata sobre todo el principio del proceso de gasificación, además de las reacciones químicas que ocurren y las temperaturas máximas en el proceso, datos importantes para el diseño energético del equipo, también sobre los diferentes tipos de gasificadores de lecho fijo y lecho móvil.

El tercer capítulo al tener una idea del combustible y de los gasificadores se desarrolló una metodología teniendo en cuenta los requerimientos del usuario, tales como el tamaño de la olla, cantidad de comida, tiempo necesario de la cocción, en los comedores populares, y además de las especificaciones técnicas, tales como montaje, si el combustible a usar se necesita un tratamiento previo, calidad del gas generado al usar diferentes tipos de gasificadores.

El cuarto capítulo se cálculo el tamaño, diámetro, aire necesario para la gasificación, datos importantes para el diseño mecánico y la selección del ventilador a utilizar, también se considera la calidad del gas generado por tal razón se usará un simple separador de partículas (ciclón) para mejorar la calidad.

El quinto capítulo trata sobre la unidad que usará el gas, en este caso será el quemador, para esto se tiene la información sobre los tipos de quemadores que existen, luego se analiza que tipo de quemador se utilizará para este gas, para luego investigar sobre estos tipos de quemadores más comunes usados en el Perú, para luego analizar los combustibles y compararlo con el gas generado.

El sexto capítulo contiene los costos del sistema, esto está vinculado con los planos del equipo, el sistema involucra las partes necesarias para la construcción del equipo y también los accesorios para el sistema, como las tuberías, codos, etc, además del tiempo estimado para la fabricación, y también si es rentable invertir en este tipo de proyecto.



CAPÍTULO 1: LA CASCARILLA DE ARROZ ALTERNATIVA ENERGÉTICA

Para el aprovechamiento de la cascarilla de arroz como combustible se debe conocer los residuos generados por el arroz en el campo (raíces, tallos y hojas), en el molino (cascarilla de arroz, polvillo nielen, arrocillo); y principalmente las propiedades bioquímicas, físicas y químicas de la cascarilla de arroz como uso alternativo de combustible.

1.1 Residuos generados en el procesamiento del arroz

Como consecuencia de la actividad agrícola del arroz, se genera una gran cantidad de residuos, y esto está aumentando, ya que el ministerio de agricultura tiene un proyecto que consiste en aumentar la cantidad de hectáreas cada año, y por ende aumentar la producción de arroz (ver tabla 1.1). Los residuos son en su mayoría quemados, o se tiran al mar o ríos, lo que genera una gran contaminación al ambiente. También se puede observar cuales son los principales productores de arroz en el Perú (ver tabla 1.2).

Tabla 1.1 Producción del arroz en los últimos 4 años [1.1]

	Producción toneladas métricas (TM)			
	2009	2010	2011	2012
Arroz cáscara	2 989 592	2 831 374	2 624 458	2 999 101

Tabla 1.2 Principales regiones del Perú que producen arroz [1.2]

Producción anual (2011)	Arroz cáscara (TM)
Piura	607 807
Lambayeque	410 125
San Martín	557 621
La Libertad	335 560
Arequipa	241 328
Tumbes	126 344
Cajamarca	212 879

Se puede observar que la producción de arroz en el Perú es elevado, y a consecuencia de esto, los residuos generados son altos, por eso a continuación se presentará en forma breve los residuos generados en la planta de arroz, la especie

de arroz que se cultiva mayoritariamente en el Perú es la *ORYZA SATIVA*, los que se dividirá en dos etapas: en el campo y en el molino.

En el campo el arroz genera residuos agrícolas como las raíces, el tallo y las hojas (figura 1.1) principalmente, porque lo que se lleva al molino son las panículas que en su interior se encuentra el arroz cáscara.

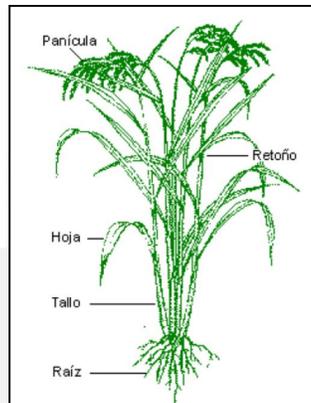


Figura 1.1 Morfología de la planta de arroz [1.3]

En el molino llega el arroz cáscara, este genera residuos del arroz cáscara tales como la cascarilla, el polvillo, nielen, y el arrocillo, quedando solo el grano de arroz. El porcentaje de residuos generados en el arroz cáscara se puede observar en la siguiente tabla 1.3.

Tabla 1.3 Distribución porcentual del arroz cáscara [1.4]

Residuo	Porcentaje (%)
Cascarilla	20 – 22
Polvillo	5 – 7
Nielen	0,7- 1
Arrocillo	1 – 2
grano de arroz	68 – 73
arroz cáscara	100

En la anterior tabla se observar que el 20% del arroz cáscara es la cascarilla de arroz, entonces de los 2 620 974 TM generados en el 2009, hay una cantidad de cascarilla de arroz de 584 194 TM, los cuales sólo el 5% de la cascarilla de arroz es usado como combustible para hornos de secado de ladrillos en el departamento de

Piura [1.5], entonces existe una gran cantidad de cascarilla de arroz que puede ser utilizado en otras aplicaciones.

1.2 Propiedades bioquímicas de la cascarilla de arroz

La cascarilla de arroz es un tejido vegetal que está compuesto por tres polímeros celulosa, lignina y hemicelulosa.

- La celulosa es un polímero lineal de unidades anhidroglucosa su compuesto es típicamente $(C_6H_{10}O_5)_n$ [1.6].
- Hemicelulosa: es un polímero mixto conformado por pentosas y hexosas
- Lignina es un polímero irregular de unidades fenilpropano

Cuando los tres polímeros se juntan forman un bloque copolímero, y su composición varía a través de la pared celular y tiene una razón atómica relativamente constante el cual es $CH_{1,4}O_{0,6}$ que puede variar ligeramente dependiendo del tipo de biomasa a usar.

Uno de los elementos que se encuentra en mayor cantidad en la cascarilla de arroz es la celulosa siendo el principal componente de las fibras como se observa en la siguiente tabla donde se muestra los valores porcentuales de la celulosa, hemicelulosa y lignina en Colombia y en varias zonas de Canadá.

Tabla 1.4 Principales propiedades bioquímicas de la cascarilla de arroz en varios lugares del mundo [1.7]

Parametros	Valores en porcentaje (%)				
	Canadá				Colombia
	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4	Zona 1
Celulosa	29,20	33,47	25,89	33,50	39,05
Hemicelulosa	20,10	21,03	18,10	21,35	27,06
Lignina	20,00	18,80	24,60	18,20	22,80

Los rangos obtenidos para el análisis químico a nivel mundial corresponden a los siguientes: La celulosa 25,89% – 39,05%; hemicelulosa 18,10% – 27,06% y la lignina 18,20% – 24,60 %.

Es importante mencionar que la lignina al ser sometida a altas temperaturas desarrolla una propiedad aglomerante en la cascarilla de arroz, transformándola en una pasta sólida difícil de romper [1.8].

1.3 Propiedades físicas de la cascarilla de arroz

Propiedades físicas se refiere al contenido de humedad, materia volátil, contenido de cenizas y densidad de la cascarilla de arroz, para obtener valores cuantificados se usa el análisis inmediato que consiste en usar un horno, donde se va elevando la temperatura y se va observando la pérdida de peso del material. El poder calorífico también se refiere a una propiedad física a continuación se detallará cada propiedad.

1.3.1 El poder calorífico

El poder calorífico de los combustibles sólidos es la cantidad de energía que la unidad de masa libera al producirse una reacción química. Para determinar el valor del poder calorífico se usa una bomba calorimétrica adiabática, a volumen constante, y los valores obtenidos corresponden al poder calorífico superior (HHV o PCS) o también conocido como poder calorífico bruto, que es el calor de condensación del agua formada en el proceso de combustión del combustible. Pero en la práctica, el agua se escapa a la atmósfera en forma de gas y el calor de vaporización del agua no se recupera y en este caso sería el poder calorífico inferior (HLV o PCI) o también conocido como poder calorífico neto

La masa del combustible siempre contiene una cierta cantidad de agua (humedad), que se libera en forma de vapor al calentarse, esto implica que parte del calor liberado durante las reacciones químicas es absorbido por el proceso de evaporación, por esta razón, el valor calorífico neto (PCI), disminuye a medida que el contenido de humedad se incrementa (ver figura 1.2 y tabla 1.5).

1.3.2 Contenido de humedad

El contenido de humedad de la biomasa es la cantidad de agua en el material, expresado como porcentaje del peso del material. En la mayoría de combustibles

viene dado por su origen y también al tratamiento que se le da previamente a ser gasificado.

Debido a que el contenido de humedad influye en el poder calorífico del combustible (ver figura 1.2 y tabla 1.5) se debe mencionar las biomásas tienen un rango de contenido de humedad, que van desde menos del 10 por ciento de los cereales de paja hasta el 50 al 70 por ciento para los residuos forestales [1.9].

El contenido de humedad de un combustible se puede sub-clasificar típicamente en tres categorías [1.10]:

- Humedad inherente al combustible es la cantidad de humedad que hay cuando se encuentra en equilibrio con el medio ambiente (normalmente a 96% - 97% de relativa). Este tipo de humedad se encuentra retenida o bien oculta en los poros del combustible.
- Humedad superficial es la cantidad de humedad hay sobre las superficies del combustible.
- Humedad producto de la descomposición es la cantidad de humedad que se genera por la descomposición térmica de compuesto orgánico que conforman el combustible. Esto se da en el rango de los 200 a 225°C, a estas temperaturas los dos primeros tipos de humedad ya se han removido del combustible (por evaporación).

Para el proceso de gasificación es mejor usar combustibles con un bajo contenido de humedad, ya que así las pérdidas de calor por evaporación son menores.

Se debe mencionar que el contenido de humedad limita el uso del proceso de gasificación, ya que si existe una cantidad alta de humedad existirán pérdidas térmicas grandes, y por ende habrá una pequeña proporción de calor útil en cual será insuficiente para mantener los procesos endotérmicos.

Un 15% de contenido de humedad en peso es recomendable para una operación del gasificador sin problemas.

Se debe mencionar que normalmente los datos de humedad del combustible están referidos a los dos primeros tipos de humedades mencionadas.

Tabla 1.5 Poder calorífico inferior de la cascarilla de arroz en función del contenido de humedad [1.11]

CONTENIDO DE HUMEDAD	PODER CALORÍFICO INFERIOR (PCI) kJ/kg
0	19 880
10	17 644
20	15 412
30	13 180
40	10 497
50	8 715
60	6 413

En el Perú el contenido de humedad es de 10,44% y el poder calorífico es de 12 924,38 kJ/kg (ver tabla 1.8).

1.3.3 Materia volátil

Contenido de materia volátil es la parte de la biomasa que se libera cuando el material se calienta (400°C a 500 ° C). Durante este proceso de calentamiento de la biomasa se descompone en gases (metano, acetileno, otros) vapores de agua, sólidos volátiles (cenizas) y hidrocarburos de la forma C_mH_n y breas. Entonces los combustibles con alto contenido de material volátil tiene el problema en la formación de breas y condensados corrosivos que obstruyen el paso del aire y gas generado.

Sin embargo, los contenidos de vapores y breas en el gas dependen de la construcción del gasificador. Las recomendaciones que se da es que si el combustible contiene más del 10% de materias volátiles, se debe emplear gasificadores de tiro invertido (Downdraft) [1.12].

La biomasa tiene un alto contenido de materia volátil, y en la tabla 1.6 se puede ver los diferentes valores en diferentes lugares del mundo como en California, China, Colombia y varias zonas de Canadá.

Tabla 1.6 Contenido de volátiles en la cascarilla de arroz en diferentes lugares del mundo [1.13]

	Canadá				California	China	Colombia
	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4	Zona 5	Zona 6	Zona 7
Materia volátil	66,40%	67,30%	63,00%	67,70%	63,52%	51,98%	65,47%

En el Perú la cascarilla de arroz tiene un 57,77% (ver tabla 1.8) de materia volátil y se puede observar que se encuentra dentro del rango mundial [51,98%- 67,70%].

1.3.4 Contenido de cenizas

El que se produzca o no escoria, depende del contenido de cenizas, del punto de fusión de las cenizas y la distribución del gasificador. Las cenizas pueden causar problemas en los gasificadores de tiro directo o de tiro invertido. La formación de escoria en el reactor genera un aumento excesivo de las formaciones alquitrán y el bloqueo total del reactor. En el peor de los casos existe la posibilidad de que se produzcan fugas de aire el cual puede ocasionar una explosión, especialmente en los gasificadores de tiro directo (Updraft).

Para no observar escorias se recomienda el uso de combustibles con 5 % o 6 % de contenido de cenizas, y entre 6 y 12% el resultado de la formación de escoria depende de la temperatura de fusión, y a partir de los 12% hay una importante formación de escorias.

Cuando el combustible tiene una mayor cantidad de contenido de cenizas, la cantidad de energía disponible del gasificador se reduce y se requiere un mayor espacio o volumen donde poder descargar dicho material. Además, si las condiciones de temperatura del hogar del gasificador son tales que propician la fusión de las cenizas que contiene, se producirá con seguridad un atoro del dispositivo, de un grado de severidad dependiente del porcentaje de cenizas del combustible. En el sentido práctico se puede decir que si la temperatura del hogar del gasificador se eleva lo suficiente para fundir las cenizas, estas fluirán formando clinker, adhiriéndose a paredes y obstruyendo las toberas de ingreso de aire y la parrilla. Por ello, el flujo de combustible se verá seriamente obstruido y limitado, propiciando un posterior aumento de la temperatura y de la relación aire-

combustible; donde el gas se verá empobrecido y finalmente llegará el momento en que no pueda ser combustionado.

Los gasificadores de tiro directo (Updraft) y de tiro invertido (Downdraft) pueden funcionar con combustibles que producen escoria, si se modifican las parrillas estáticas a parrillas de movimiento continuo. Los gasificadores de tiro transversal (Crossdraft) que trabajan a temperaturas muy elevadas, de 1 500°C, y se necesitan precauciones especiales respecto a la temperatura de fusión de la ceniza del combustible.

Se debe mencionar que si en el proceso la relación aire-combustible se alcanza el valor estequiométrico correspondiente a la reacción de combustión, el gasificador se dañaría seriamente. En la tabla 1.7 se puede ver el alto contenido de ceniza que tiene la cascarilla de arroz alrededor del mundo.

Tabla 1.7 Contenido de cenizas en la cascarilla de arroz en diferentes lugares del mundo [1.14]

	Canadá				California	China	Colombia
	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4	Zona 5	Zona 6	Zona 7
Ceniza	20,00	18,80	24,60	18,20	18,67	16,92	17,89

En el Perú el contenido de ceniza tiene un valor del 17,51% (ver tabla 1.8) y se encuentra dentro del rango mundial [16,92% - 24,60%].

1.3.5 Densidad aparente

La densidad aparente se refiere peso de la materia por unidad de volumen. Entonces la densidad y el poder calorífico nos dan la densidad de energía, es decir, la energía potencial por unidad de biomasa. En general la densidad de energía está entre la mitad y la décima parte del carbón (ver figura 1.2). Entonces, los combustibles de alta densidad aparente tienen ventajas porque poseen un alto valor de energía por volumen.

Así como la humedad, la densidad aparente tiene una variación extrema en la biomasa, desde mínimos 150 a 200 kg/m³ de paja y virutas de grano de cereal a máximos de 600 a 900 kg/m³ (ver figura 1.2) para la madera sólida.

Los combustibles de alta densidad aparente tienen ventajas, porque representan un alto valor de energía por volumen; consecuentemente, estos combustibles necesitan menos espacio de depósito para un tiempo dado de recarga.

Los combustibles de baja densidad aparente tienen la desventaja de producir un caudal insuficiente de gas lo que genera poderes caloríficos del gas reducido. Por lo dicho anteriormente la densidad aparente es importante, ya que se puede tener una idea del dimensionamiento de la tolva de cámara de combustible del gasificador y el tamaño del mismo. Pero el volumen ocupado por un combustible almacenado no solo depende de la densidad específica (partículas individuales), sino también del contenido de humedad, del tamaño, de la distribución granulométrica y del modo en que el combustible es cargado (es decir, si se encuentra muy compacto o si se verifican amplios espacios intersticiales).

También es importante mencionar que la densidad aparente tiene un impacto fuerte en la calidad del gas generado puesto que de él depende el tiempo de residencia del combustible en la zona de combustión, la velocidad de quemado del combustible, la densidad del lecho combustible y el flujo o caudal del gas. El tiempo de residencia del combustible determina hasta qué punto tiene lugar las reacciones de combustión parcial y reducción; por ejemplo un tiempo de residencia muy corto origina una conversión incompleta de CO₂ en CO, un gas de calidad muy pobre (poco combustible, bajo contenido de poder calorífico) y muchas tras de carbón no quemado en las cenizas removidas, representado un fuerte desaprovechamiento del combustible. Por el contrario, un tiempo de resistencia muy prolongado aumenta las formaciones de escorias y residuos sólidos.

La densidad de la cascarilla de arroz es aproximadamente 100 kg/m³ [1.15] , siendo un valor muy cercano a los 110 kg/m³ [1.16] que tiene la cascarilla de arroz en el Perú.

En la siguiente tabla se presenta los valores del análisis inmediato que se realizó a la cascarilla de arroz en el Perú

Tabla 1.8 Valores de las propiedades físicas de la cascarilla de arroz en el Perú [1.17]

Parámetros	Valores
Humedad	10,44%
Materia Volátil	57,77%
Contenido de cenizas	17,51%
Carbono fijo	14,27%
Total	100%
Poder calorífico	12 924,38 kJ/kg

1.4 Propiedades químicas de la cascarilla de arroz

Propiedades químicas se refiere a la composición química (carbono, nitrógeno, oxígeno, cloro, azufre, hidrógeno), para obtener las propiedades químicas del combustible se tiene que hacer un análisis elemental, La técnica está basada en la completa e instantánea oxidación de la muestra mediante una combustión con oxígeno puro a una temperatura aproximada de 1 000°C, donde se obtiene los diferentes productos de combustión CO_2 , H_2O y N_2 , donde son transportados a un tubo de reducción y después selectivamente separados en columnas específicas para ser luego desorbidos térmicamente. Finalmente, los gases pasan de forma separada por un detector de conductividad térmica que proporciona una señal proporcional a la concentración de cada uno de los componentes individuales de la mezcla.

1.4.1 Composición elemental

La composición elemental de las biomásas es relativamente uniforme en su contenido (porcentaje en masa) de carbono (C), hidrógeno (H), azufre(S), oxígeno(O), nitrógeno(N), y cenizas (ver tabla 1.10). Estos valores ayudan para el análisis de los procesos de combustión, entre ellos: cálculos de la de los volúmenes de aire, gases y entalpía.

La composición elemental de la biomasa tiene múltiples efectos en la utilización térmica, C, H y O son los principales componentes que presenta la biomasa, y son de especial importancia para el poder calorífico superior (bruto), además también para el poder calorífico inferior (neto). El contenido de nitrógeno (N) es responsable de la formación de óxidos de nitrógeno (NO Y NO_2 denominados NO_x), el cloro y

el azufre pueden estar presentes en pequeñas cantidades y forman el SO_2 (Dióxido de sulfuro u óxido de sulfuro) y HCL (ácido clorhídrico) durante la combustión.

A continuación se detallará de cada componente, los efectos que tienen en las propiedades de la cascarilla de arroz y el impacto ambiental que pueden producir.

- Carbono (C) , hidrógeno (H) y oxígeno (O)

El contenido de C y H se oxidan durante la combustión por una reacción exotérmica (formación de CO_2 y H_2O). Estos mismos componentes contribuyen positivamente al poder calorífico superior (bruto), pero el contenido de O contribuye negativamente. El H influye en el poder calorífico inferior (neto) debido a la formación de agua. Al tratarse de un proceso de gasificación donde la combustión es incompleta esto provoca emisiones de carbono sin quemar por contaminantes, como el monóxido de carbono, alquitrán (tar) y el hollín. Para tratar de minimizar estas emisiones se recomienda un proceso de combustión optimizado ofreciendo una buena mezcla entre el combustible y al aire, un tiempo de retención suficiente (>1.5 segundos), altas temperaturas (> 850 °C) y una relación estequiometría baja.[1.18]

- Nitrógeno (N)

Los óxidos de nitrógeno (NO y NO_2 denominados NO_x) también contribuyen a la formación de lluvias ácidas. Se puede producir de dos maneras el NO_x los cuales se producen durante la combustión. El contenido de nitrógeno depende del tipo de biomasa que se va usar como por ejemplo la madera, cascarillas mazorcas y tallos tienen un bajo contenido de nitrógeno, sin embargo las hojas y semillas tienen un alto contenido de nitrógeno. Pero dependiendo de la temperatura de gasificación, esto es significativamente menor en los gasificadores, que las emisiones de NO_x producido por los sistemas de combustión.[1.19]

- Azufre (Z) y Cloro (Cl)

El azufre y cloro pueden estar presentes en pequeñas cantidades (ver tabla 1.9), y pueden contribuir a la formación de lluvias ácidas cuando estos se convierten en SO_2 (Dióxido de sulfuro o óxido de sulfuro) y HCL (ácido clorhídrico) durante la combustión. [1.20]

A continuación se muestra las máximas concentraciones de nitrógeno, azufre y cloro, y los resultados del análisis aproximado de la cascarilla de arroz en diferentes zonas del mundo.

Tabla 1.9 Los máximos concentraciones de cloro, azufre y nitrógeno y sus consecuencias [1.21]

Elemento	Concentración (%)	Consecuencias
Nitrógeno	<0,6	Emisiones de NO _x
Cloro	<0,1	Corrosión
	<0,1	Emisiones de HCl
Azufre	<0,1	Corrosión
	<0,2	Emisiones de SO _x

Tabla 1.10 Composición de la cascarilla de arroz en diferentes lugares del mundo [1.22]

Parámetros	Valores en porcentajes (%)					
	Canadá				California	China
	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4	Zona 5	Zona 6
C	37,60	42,10	38,70	42,60	38,83	37,60
H	5,42	4,98	4,70	5,10	4,75	5,78
O	36,56	33,66	31,37	33,44	35,47	37,62
N	0,38	0,40	0,50	0,51	0,52	1,88
S	0,03	0,02	0,01	0,02	0,05	0,09
Cl	0,01	0,04	0,12	0,13	0,12	0,00
Cenizas	20,00	18,80	24,60	18,20	18,67	16,92
Total	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

1.5 Punto de fusión de la ceniza de la cascarilla de arroz

El uso de fertilizantes en los cultivos hace que las cenizas tengan óxidos de potasio (K₂O). Este tiene un punto de fusión relativamente bajo y en medida que aumente la proporción el punto de fusión disminuirá. Sin embargo, la ceniza de la cascarilla de arroz contiene un bajo contenido de óxido de potasio. Además la ceniza obtenida al quemar la cascarilla de arroz tiene un alto contenido de óxido de sílice que tiene un punto de fusión alto (1 450 °C).

Por esta razón el punto de fusión de la ceniza de la cáscara de arroz está alrededor de los 1 500 °C y no debería presentarse problemas de la escorificación por bajo punto de fusión de las cenizas. [1.23].

Referencias bibliográficas del capítulo 1

- [1.1] Ministerio de Agricultura
2012 *Estadística agraria mensual*. Lima. Consulta: 1 de febrero del 2013
<http://www.minag.gob.pe/portal/download/pdf/herramientas/bol-etines/boletineselectronicos/estadisticaagrariamensual/2012/bemsa_diciembre12.pdf>
- [1.2] íd.
- [1.3] Figura sacada de la pagina web:
<http://www.regmurcia.com/servlet/s.SI?sit=c,24,m,1455&r=ReP-23199-DETALLE_REPORTAJESPADRE>
- [1.4] Grupo de investigación y desarrollo en carbón y biocombustibles
2007 *Densificados para uso energético empleando residuos agrícolas y Forestales* [diapositivas]. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú. Consulta: 1 de junio del 2012
<http://www.minag.gob.pe/portal/download/pdf/especiales/bioenergía/COBER_2008/Foro_07/Estela_Assureira.pdf >
- [1.5] ASSUREIRA, Estela
2001 *Utilización de la cascarilla de arroz como fuente alterna de energía con bajo impacto ambiental*. Lima.
- [1.6] REED, Thomas B.
2007 *Encyclopedia of biomass thermal conversion: the principles and technology of pyrolysis, gasification & combustion*. Tercera
- [1.7] AGUSTIN VALVERDE, BIENVENIDO SARRIA y José MONTEAGUDO
2007 *Análisis comparativo de las características físicoquímicas de la cascarilla de arroz*. Colombia. Consulta: 15 de julio del 2012
<<http://redalyc.uaemex.mx/src/inicio/ArtPdfRed.jsp?iCve=84903743> >
- [1.8] Ibíd.
- [1.9] VENTURA VERME, Mario
1992 *Diseño de una planta piloto para gasificar carbón antracítico que permitirá el accionamiento de un motor de combustión de 20kW*. Tesis de licenciatura en Ciencias e Ingeniería con mención en Ingeniería Mecánica. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú, Facultad de Ciencias e Ingeniería
- [1.10] íd.
- [1.11] AGUSTIN VALVERDE, op. cit.

- [1.12] VENTURA, op. cit.
- [1.13] AGUSTIN VALVERDE, op. cit.
- [1.14] íd.
- [1.15] KAUPP, Albrecht
1984 *Gasification of rice hulls: theory and practice*. Primera edición.
Braunschweig ; Wiesbade: Vieweg
- [1.16] Assureira , op. cit.
- [1.17] Proyecto Carbon
Resultados del análisis inmediato de la cascarilla de arroz. Lima
- [1.18] Obernberger, Ingwald
2006 *Chemical properties of solid biofuels - significance and impact*,
Volumen 30, numero 11, pp 5-11
- [1.19] QUAACK, op. cit.
- [1.20] íd.
- [1.21] Obernberger, op. cit.
- [1.22] AGUSTIN VALVERDE, op. cit.
- [1.23] Íd.

CAPITULO 2 PRINCIPIOS DE FUNCIONAMIENTO DE UN GASIFICADOR

En este capítulo se dará a conocer las tecnologías desarrolladas a nivel mundial de los gasificadores en aplicaciones domésticas y comerciales usando como combustible cascarilla de arroz, además se detallará el principio de la gasificación y los diferentes tipos de gasificadores que existen.

También se realizará un cuadro detallando las ventajas y desventajas de los diferentes tipos de gasificadores, y luego se hará un cuadro que comparando las diferentes ventajas físicas y químicas de los gasificadores de lecho fijo, esto nos dará una visión general del gasificador que se usará en el presente trabajo.

2.1 Estado de la tecnología

El desarrollo del proceso de la gasificación usando residuos agrícolas en el país es casi nulo, pero a nivel mundial es una gran alternativa para generar energía o electricidad.

- En el Centro de Tecnología Apropiada del Departamento de Ingeniería Agrícola y Gestión del Medio Ambiente de la universidad central de Filipinas se desarrolló un gasificador para aplicaciones domésticas usando un súper turbo generador de gas, esta es una tecnología recientemente descubierta para la quema de cascarilla de arroz que usa un inyección de vapor. Mediante la inyección de vapor en la quema de cascarilla de arroz se consigue una combustión más limpia, más eficiencia y un mejor quemado del combustible.



Figura 2.1 Gasificador con inyección de vapor [2.1]

- En Indonesia se desarrolló un gasificador de tipo downdraft con tres quemadores (figura 2.2), por *MJ APPROTECH* con la participación de Haryadi, Supriyadi y Joel Belonio, el cual usaba como combustible cascarilla de arroz. Una serie de ensayos demostró que se necesita 10 a 15 minutos para el encendido, dos litros de agua alcanza el punto de ebullición en 8 a 9 minutos, mientras que 3 litros de agua se hierve en un período de 11 a 19 minutos. La cantidad de combustible consumido rangos de 6,3 a 8,0 kilos por hora para los tres quemadores. La potencia generada se encuentra entre 13,6 kW y 17,6 kW.



Figura 2.2 Gasificador con múltiples quemadores [2.2]

- El Instituto Tecnológico de Asia (AIT) desarrollo una estufa o cocina llamada IGV-2 (ver figura 2.3). Esta estufa tiene una válvula mariposa que regula la cantidad de aire que ingresa a la cámara, además se enciende entre 6 a 8 minutos y se puede usar diferentes combustibles teniendo diferentes eficiencias como 22.2% para ramas de madera ,27.8% para astillas de madera y un 17.1% para briquetas de cascarillas de arroz.



Figura 2.3 Gasificador IGS-2 [2.3]

2.2 El proceso de la Gasificación

La gasificación es el proceso en el cual la biomasa se convierte, mediante oxidación parcial a temperatura elevada, en un gas pobre con un moderado calor específico, normalmente se trabaja con el 25 a 30% del aire necesario para la oxidación completa.

En el proceso de gasificación de biomásas hay tres tipos de procesos térmicos importantes los cuales depende de las condiciones de operación, del combustible (residuos agrícolas, madera, carbón, etc.) y del agente gasificante (oxígeno puro, o vapor de agua o aire) que se usará.

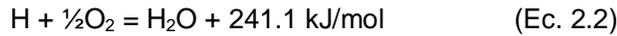
Los tres procesos térmicos importantes en la gasificación son la pirolisis, oxidación o combustión y reducción o gasificación, también existe un proceso de secado del combustible, a continuación se detallará cada uno de estos procesos.

Zona de secado del combustible: se introduce las biomásas en la parte superior del gasificador y se tolera una pequeña cantidad de fuga de aire en este espacio.

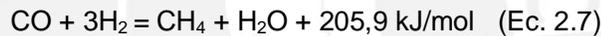
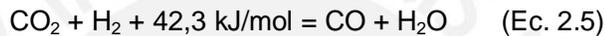
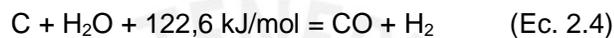
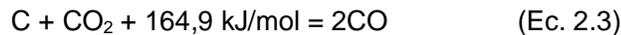
Como resultado de la transferencia de calor desde las partes más bajas de la gasificación, el secado de la biomasa de combustible se produce en esta sección donde el agua contenido en la biomasa es removido a una temperatura superior a los 100°C.

Pirolisis o descomposición térmica: es la etapa en el cual hay un rompimiento del material por medio de un calor intenso en ausencia de aire (aproximadamente 350°C). El combustible se descompone en una mezcla de sólido, líquido y gas. La parte sólida es un residuo carbonoso o también llamado char y a los líquidos, debido a la presencia de alquitranes y vapores condensables se le denomina tar.

Oxidación o combustión: tiene lugar cuando el agente gasificante es un oxidante lo cual implica reacción de oxidación, los cuales son exotérmicas, Aquí se genera el calor necesario para que el proceso se mantenga y las reacciones que se generan son:



Reducción o gasificación: en este proceso, el oxígeno del aire quema parcialmente el residuo carbonoso procedente de la pirólisis (proceso simultáneo al de gasificación), aquí se generan reacciones endotérmicas. Las reacciones más importantes en la zona de reducción son:



En la figura 2.4 se presenta un resumen de los procesos que ocurren en la gasificación, y además con sus respectivas reacciones.

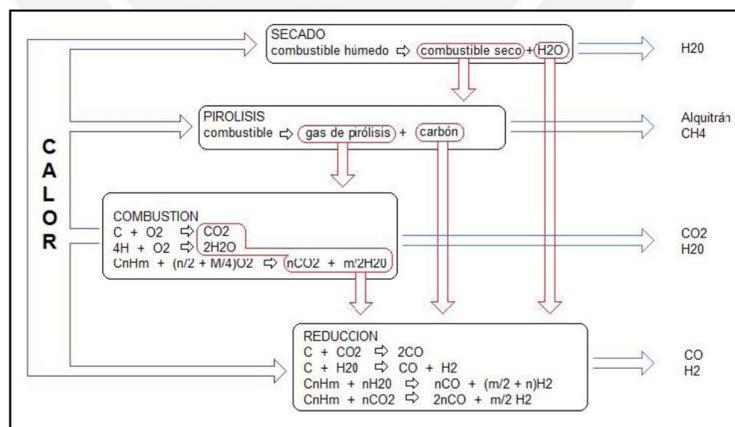


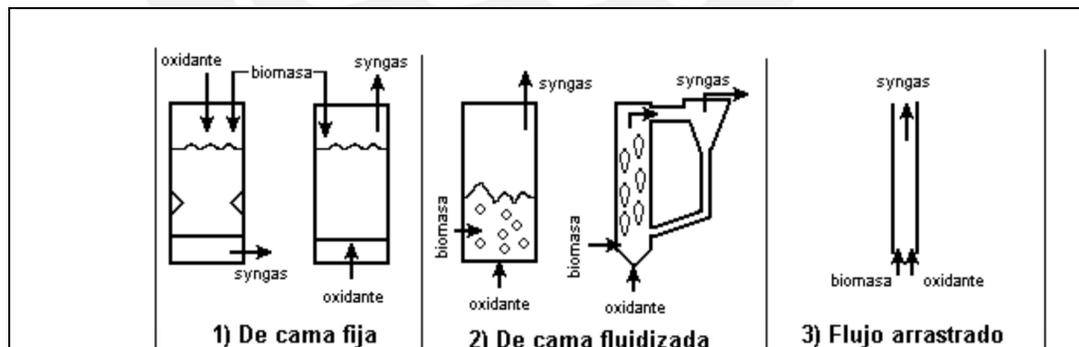
Figura 2.4 Etapas de la gasificación. [2.4]

2.3 Tipo de gasificadores

Se puede clasificar en tres grupos fundamentales, esta clasificación se da en función a como sale el gas del gasificador (en caso de los lechos fijos) y los

demás en función al proceso que se le da para obtener el gas, a continuación se detallará cada grupo.

- De lecho fijo: en donde el combustible permanece estático dentro del gasificador, un lecho de partículas de combustible sólido a través del cual pasa aire y el gas ya sea hacia arriba o hacia abajo; son el tipo más simple de gasificadores y son las únicas aptas para la aplicación en baja escala. Estos gasificadores se subdividen, según el sentido del flujo del agente gasificante en: Gasificador de cama fina en contracorriente (updraft), gasificador de cama fija en corriente paralela (downdraft) y gasificador de tiro cruzado (crossdraft).
- De cama fluidizada: en donde el combustible viaja dentro del gasificador junto con el agente de oxidación, el cual reacciona con las partículas de biomasa mientras se encuentran en suspensión, el aire se eleva a través de una reja a una velocidad lo suficientemente alta como para hacer levitar las partículas por encima de la rejilla, formando así un "lecho fluidizado".
- De flujo arrastrado: en donde el combustible es pulverizado para lograr una densa nube de combustible, forzando al agente gasificante a fluir a través de él, reaccionando al pasar.



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

Figura 2.5 Cuadro comparativo entre los diferentes tipos de gasificadores [2.5]

2.3.1 Gasificadores de cama fija o lecho fijo

A. El gasificador de contra corriente de lecho fijo (Updraft)

Es el tipo de gasificador más simple y consiste en un lecho fijo de combustible el cual el agente gasificante (aire) fluye en dirección opuesta al flujo del combustible. La ceniza es removida como polvo o como escoria, por la parte inferior del gasificador. En la zona superior se produce el secado del combustible que es un proceso endotérmico con consumo de unas 600 kcal/kg de agua evaporada aproximadamente. La segunda zona es la de pirolisis el cual el combustible en ausencia de aire o casi sin aire, se descompone generando el gas de pirolisis, carbón, alquitrán. En la tercera zona se considera que se entra a la zona de gasificación, en la primera franja a 600°C se produce la reducción de los gases como CO_2 , H_2O para formar CO y H_2 , consumiendo energía térmica y enfriando los gases ascendentes. En la última zona, cerca de la parrilla o rejilla, se produce el contacto de los gases de alimentación (aire) con la fase final del proceso, en dicha zona se produce el calentamiento de los gases y las reacciones de oxidación de los residuos de combustible con el oxígeno de la alimentación generando reacciones exotérmicas de formación CO y CO_2 .

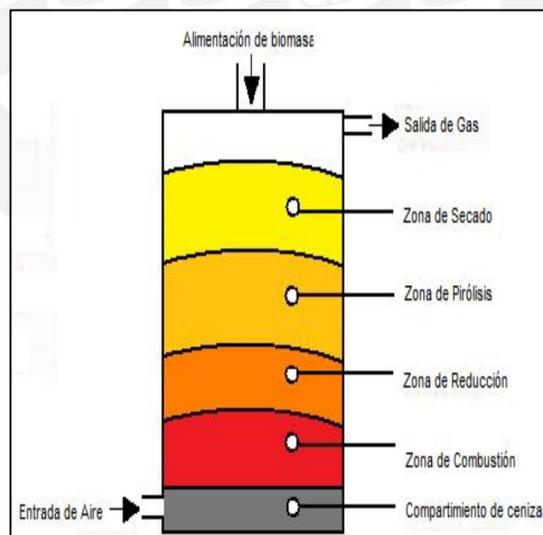


Figura 2.5 Zonas de reacción para un gasificador tipo Updraft [2.6]

B. El gasificador de corriente paralela (Downdraft)

El funcionamiento de este gasificador es parecido al de contra corriente (Updraft), pero el orden de las reacciones son algo diferentes. El agente de gasificación fluye

en la misma dirección del combustible, el gas producido sale por la parte inferior del gasificador a alta temperatura.

La diferencia entre un gasificador de corriente paralela (Downdraft) y el de contracorriente (Updraft). está en que el de corriente paralela (Updraft) los gases liberados en las etapas de pirólisis y la zona de reducción, pasan necesariamente por la zona de alta temperatura en la parte de la oxidación, mientras que en los gasificadores de corriente paralela (Downdraft) los gases liberados de la pirólisis pasan primero a la zona de combustión y después a la zona de reducción, esto hace que los gases de pirólisis sean bien quemados y que los alquitranes formados tiendan a desaparecer al pasar por el frente de la gasificación.

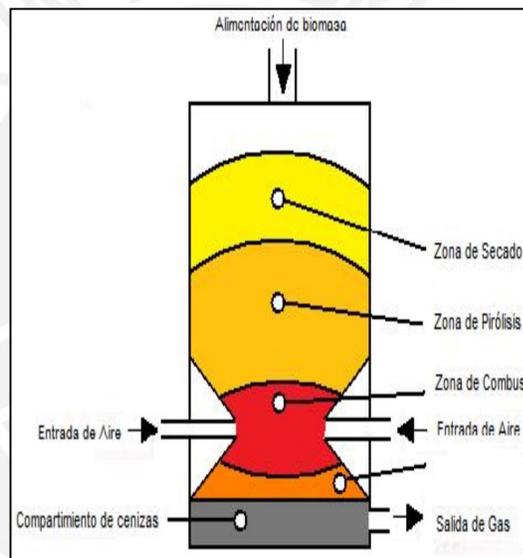


Figura 2.6 Diferentes zonas de reacción para un gasificador tipo Downdraft [2.7]

C. El gasificador de tiro cruzado (Crossdraft)

El principio de funcionamiento de este gasificador es el mismo que al de downdraft, con la diferencia fundamental que los flujos de combustibles y agente oxidante entran al gasificador en forma perpendicular entre sí, estos se unen en la zona de combustión, reaccionando y debido al tiro producido por la diferencia de presiones entre la entrada y la salida del reactor, el gas producido sale por el lado opuesto al que entra el agente gasificante.

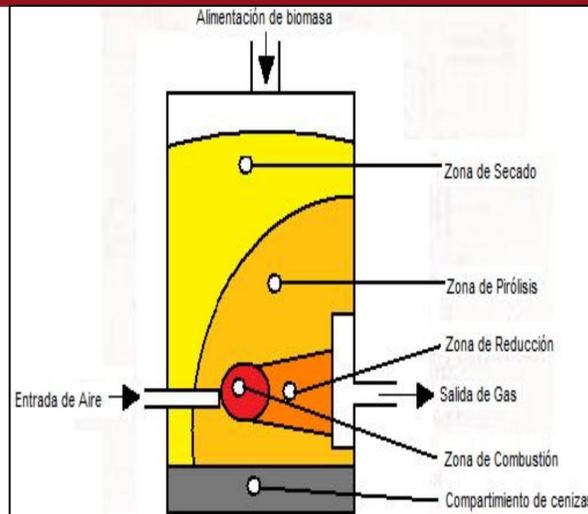


Figura 2.7 Diferentes zonas de reacción en un gasificador tipo crossdraft [2.8]

2.3.2 Gasificador de cama fluidizada

El combustible es fluidizado en el aire o vapor. La ceniza es removida como polvo al caer por la gravedad. Se sopla aire a través el cual eleva a las partículas sólidas a velocidad suficiente para mantenerlas en estado de suspensión. Después por medio de una fuente externa de calor se comienza a calentar el lecho y el material de alimentación se introduce tan pronto como se alcanza una temperatura suficientemente elevada. Las partículas del combustible se introducen por el fondo del reactor, se mezclan muy rápidamente con el material del lecho y se calientan casi instantáneamente alcanzando la temperatura del lecho.

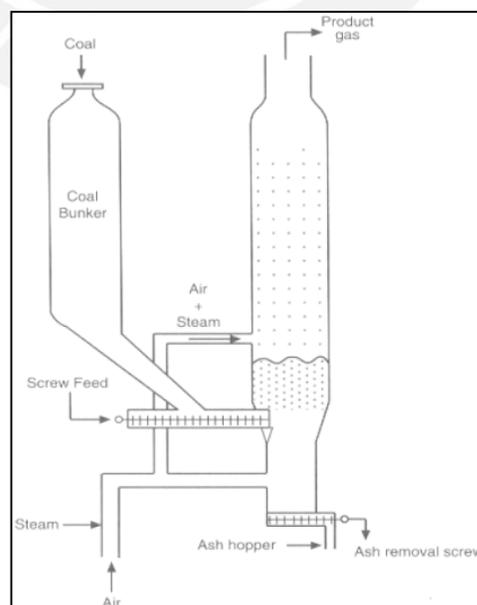


Figura 2.8 Funcionamiento de un gasificador de cama fluidizada [2.9]

2.3.3 Gasificador de flujo arrastrado

El tipo de gasificador funciona a partir de dividir finamente el combustible ($<0,1$ mm), reacciona con vapor y oxígeno en una zona de alta temperatura y presión (temperaturas de $1\ 500^{\circ}\text{C}$ a $1\ 600^{\circ}\text{C}$ y presiones de 25 bar a 40 bar) y gran turbulencia, donde se produce una intensa mezcla del combustible con los agentes gasificantes. Las altas temperaturas y presiones facilitan el alcance de muy altos desempeños, aunque la eficiencia térmica es baja debido a que el gas producido debe ser enfriado antes de ser filtrado con las tecnologías existentes actualmente.

Todos los gasificadores de flujo arrastrado remueven la mayor parte de la ceniza en forma de escoria debido a la alta temperatura de funcionamiento es mayor que la temperatura de fusión de la ceniza. Entonces, en estas condiciones las cenizas fundidas del combustible fluyen en forma de lava por la parte inferior del gasificador, antes de solidificarse por enfriamiento, y el gas abandona el reactor por la parte superior.

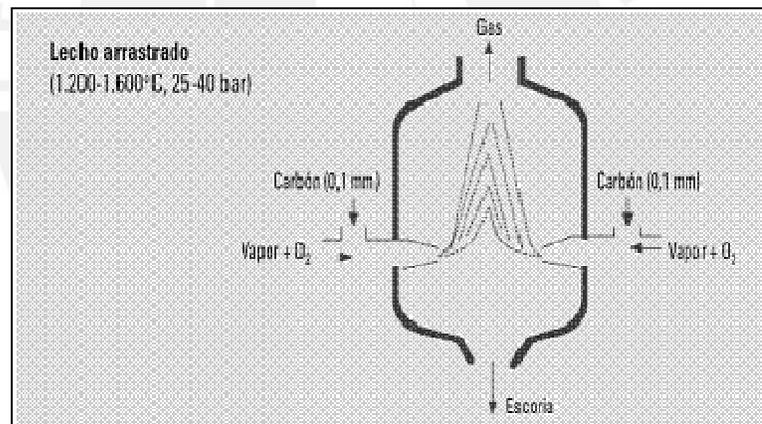


Figura 2.9 Funcionamiento de un gasificador de lecho arrastrado [2.10]

2.4 Ventajas y desventajas de los diferentes gasificadores

A continuación en la tabla 2.1 se verán las ventajas y desventajas de cada tipo de gasificador:

Tabla 2.1 Ventajas y desventajas de cada tipo de gasificador

Tipo de gasificador	Ventajas	Desventajas
Contra corriente (updraft)	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Simplicidad en la construcción y uso ➤ Baja temperatura del gas producido ➤ Alta eficiencia en la gasificación ➤ Puede utilizarse combustibles con alta humedad 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Gran cantidad de brea y alquitrán
Corriente paralela (downdraft)	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Alto rango de potencias desde 80kw hasta 500 kw o más. ➤ La producción de un gas tiene un bajo contenido de tar 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Grandes cantidades de cenizas y partículas de polvos ➤ El combustible debe ser preparado ➤ Altas temperaturas en la salida de gases ➤ El contenido de humedad debe ser menor al 25% (en base humedad)
Tiro cruzado (crossdraft)	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Puede operarse e pequeñas escalas 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Alta cantidad de cenizas en los gases de combustión ➤ El combustible debe ser previamente preparado ➤ Alta temperatura de los gases producidos ➤ Baja eficiencia térmica en la gasificación ➤ Debe utilizarse biomasa seca
Cama fluidizada	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Rendimientos mayores a los gasificadores de tipo cama fijo ➤ Puede trabajar con combustibles altamente corrosivo 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Debe utilizarse un combustible altamente reactivo ➤ La ceniza generada , generalmente es altamente corrosiva
Gasificador de flujo arrastrado	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Alcance de altos desempeños ➤ Las altas temperaturas garantizan la ausencia de breas y alquitranes ➤ Eliminación de las cenizas en forma de escoria ➤ Utilización a gran escala 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Mayor consumo de aire primario ➤ La pulverización o atomización del combustible ➤ Mayores necesidades energéticas

Por la pequeña escala de potencia del gasificador que se empleará el más indicado son los de de lecho fijo, por eso a continuación en la tabla 2.2 se da las diferentes características físicas y químicas de cada gasificador de lecho fijo.

Tabla 2.2 Comparación de diferentes gasificadores de lecho fijo [2.11]

Parámetros	Updraft	Downdraft	Crossdraft
Combustible específico	Moderado, puede aceptar otro tipo de combustible	El combustible tiene que ser específico	Moderado, puede aceptar otro tipo de combustible
Tamaño del combustible	Muy bueno	bueno	Bueno
Contenido de cenizas	Es muy sensible al contenido de cenizas	Es muy sensible al contenido de cenizas	Es muy sensible al contenido de cenizas
Temperatura de reacción	1 000°C	1 000°C	900°C
Temperatura del gas de salida	250°C	800°C	900°C
Tar (líquido producido en la pirolisis) en el gas generado	El contenido de tar es muy alto	El contenido de tar es muy bajo	El contenido de tar es muy alto
Eficiencia térmica	Tiene una excelente eficiencia térmica	Tiene muy buena eficiencia térmica	Tiene una buena eficiencia térmica

Referencias bibliográficas del capítulo 2

- [2.1] BELONIO Alexis T.
2005 *Rice husk gas stove handbook*. Iloilo Consulta: 2 de junio del 2012
<http://www.bioenergylists.org/stovesdoc/Belonio/Belonio_gasifier.pdf>
- [2.2] BELONIO Alexis , Rustamadji, y BimaTahar
2009 *A three-burner rice husk gas stove developed in Indonesia, Tangerang*. Consulta: 2 de junio del 2012
<<http://www.cc.cc/g1g265546>>
- [2.3] BHATTACHARYA y Augustus LEON
2001 *A biomass-fired gasifier stove (IGS-2) for institutional cooking*. Yogyakarta. Consulta : 2 de junio del 2012
<http://www.retsasia.ait.ac.th/Publications/Glow_Indonesia.pdf>
- [2.4] Biomass technology group
2008 *BTG Biomass Gasification*. Enschede. Consulta: 15 de mayo 2012
<<http://www.btgworld.com/uploads/documents/Gasification%20Attachment%20Website%20v2.pdf>>
- [2.5] Íd.
- [2.6] GARAY CASTRO, Camila, Carlos GUEVARA CERNA y Jorge SORTO MACHADO
2008 *Desarrollo de una nueva cocina mejorada para leña basada en el principio de gasificación de flujo cruzado natural*. Tesis de licenciatura en la facultad de ingeniería y arquitectura con mención en Ingeniería Mecánica. Antiguo Cuscatlan, El salvador: UNIVERSIDAD CENTROAMERICANA “JOSE SIMEON CAÑAS”, Consulta: Abril del 2012
<http://cef.uca.edu.sv/descargables/tesis_descargables/cocina_mejorada.pdf>
- [2.7] Íd.
- [2.8] Íd.
- [2.9] BASU, Prabir.
2006 *Combustion and gasification in fluidized beds*. Boca Raton, FL: Taylor & Francis
- [2.10] Hugh Rudnick
2008 *Tecnologías Modernas de Plantas Termoeléctricas a Carbón, Impacto en el Medio Ambiente y Costos*. Santiago de Chile
Consulta: 24 de junio del 2012
<<http://web.ing.puc.cl/~power/mercados/carbon/carbon.htm>>
- [2.11] BASU op. cit.

CAPÍTULO 3 CRITERIOS PARA LA SELECCIÓN DEL GASIFICADOR

En este capítulo se desarrolla la metodología para la selección del gasificador más adecuado, que emplea la cascarilla de arroz como combustible, además de analizar las necesidades del usuario, como la salud y el confort. Para esto se debe tener en cuenta al combustible a usar, en este caso es la cascarilla de arroz, por eso se verá las ventajas y desventajas de usar este tipo de combustible, y los cuidados que se debe tener para el usuario.

3.1 Modelo conceptual

Lo que se propone es diseñar un equipo generador de gas para uso en procesos de cocción para aplicación comercial (restaurant, comedores populares, cocinas de las cárceles), por eso el diseño de los componentes del equipo tales como la cámara de combustión, sistema de alimentación del combustible, sistema de regulación (control), deben responder a los requerimientos de los usuarios, a los materiales disponibles en el país y a la tecnología existente para la fabricación, así también las exigencias de seguridad, salubridad y comodidad para que el usuario no tenga ningún inconveniente al manipularlo. La figura 3.1 presenta un modelo conceptual en el cual se han considerado los requerimientos del usuario y los aspectos técnicos.

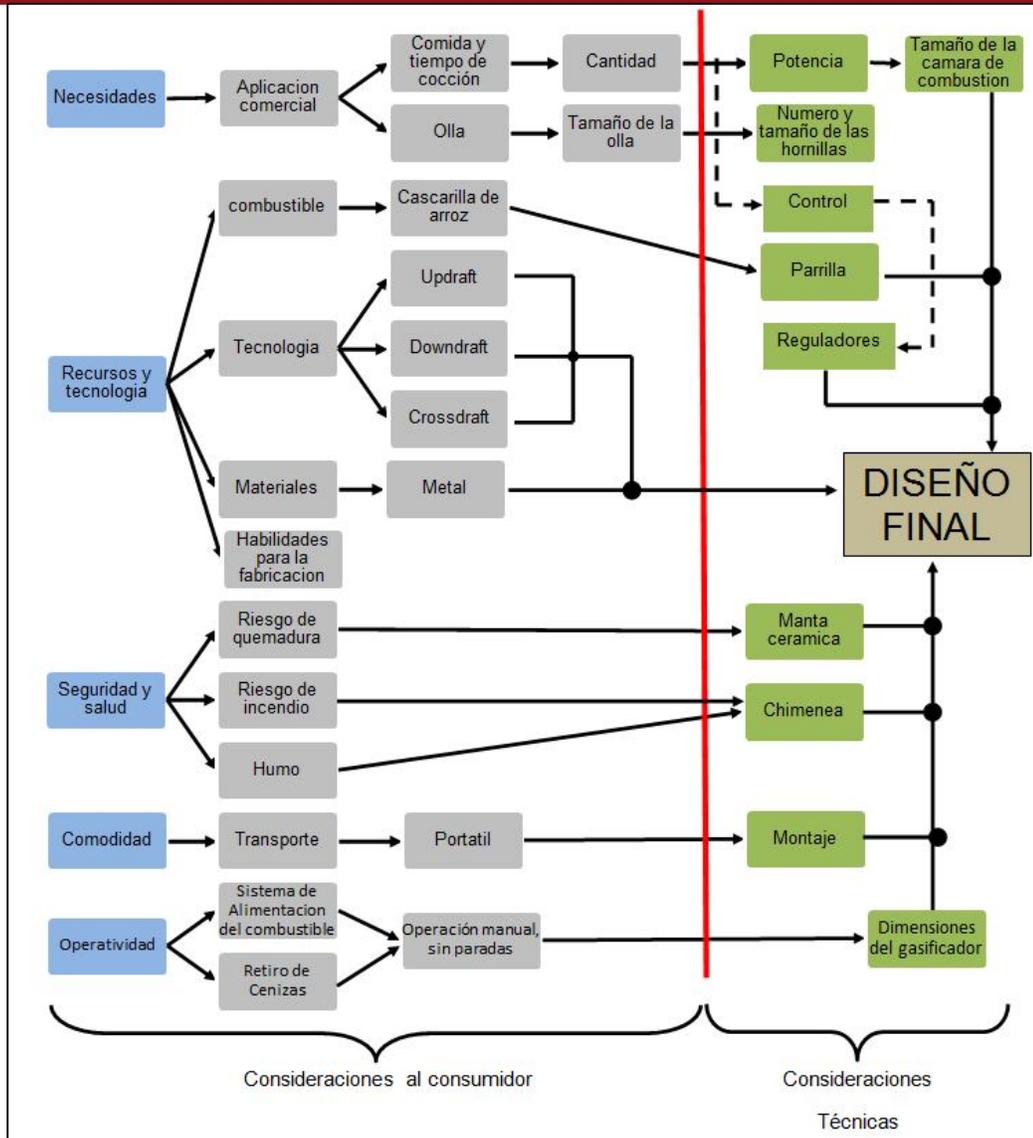


Figura 3.1 Modelo conceptual

A continuación se explica cada parte de la figura 3.1.

3.1.1 Necesidades

La finalidad que va a tener el gasificador es la generación de gas para uso comercial en procesos de cocción, es decir para un elevado número de raciones y para la preparación de 2 o 3 platos en simultáneo, con la finalidad de poder definir menor los requerimientos se ha considerado el perfil de un comedor.

Características de menú

El número de raciones que se atiende es entre 80 a 120 raciones (comedor grande), los comedores suelen operar de lunes a sábado brindando almuerzo y lonche. El menú consiste como plato de entrada, el plato de fondo y el postre, el menú varía en la semana de acuerdo a lo establecido de las comidas diarias. Los platos que prepara con mayor frecuencia están elaborados de arroz, menestra, pollo, pescado, complementando con ensalada, camote, sopa, mazamorra y refresco.

A. Característica de la cocina

Se considera la necesidad de tres quemadores, ya que por lo expresado anteriormente, uno servirá para la cocción de arroz, el otro servirá para las menestras y el último para la preparación de sopa. Entonces el siguiente paso es identificar la cantidad de comida que se va a preparar, esto dará un idea de la potencia que se necesita suministrar ,y por ende nos dará el tamaño de la cámara de la combustión, después se verá también el tamaño de la olla ,y esto el tamaño de las hornillas, y por último el tiempo de cocción, pero este depende de la cantidad de comida, por consiguiente estará involucrado con la potencia y este último nos permitirá determinar la cantidad de cascarilla de arroz que se va a consumir. La potencia o cantidad de gas se contralara mediante reguladores (válvulas), ya que habrá momentos en que solo se hervirá agua donde no se necesita toda la potencia.

B. Necesidades del usuarios

El alcance del proyecto se debe tener en cuenta los problemas de salud, al medio ambiente y los parámetros más importantes a considerar.

Salud

- Los quemadores donde se utilizar el gas generado por el equipo deben prevenir el humo en el interior.
- El gas generado por el equipo debe prevenir la acumulación del hollín en los pulmones y la casa.
- Se debe reducir al mínimo la inhalación del monóxido de carbono y de las partículas en suspensión. Así se reduce la enfermedad respiratoria asociada

a la contaminación del aire interior y otras infecciones por ejemplo, cataratas.

- Las enfermedades respiratorias serias tales como neumonía disminuirían si los niveles de contaminación del aire interior reducen al mínimo.

Medio ambiente

- La cocina debe emitir la menor cantidad de gases de invernadero en el aire, comparado con las cocinas a kerosene.
- Un buen diseño de la cámara de combustión reducen la cantidad de humo

Comercial

- Debe tener como mínimo tres quemadores.
- Se usará ollas de 130 litros (55 cm. x 55 cm.), 100 litros (50 cm. x 50 cm.) y 72 litros (45 cm. x 45 cm.).
- Se usará sartenes de 40 cm.
- Se debe atender entre 80 a 120 personas por día.

3.1.2 Recursos locales y tecnología

En la figura 3.1 se menciona los recursos locales disponibles (combustible) en el Perú y a la tecnología usada en el mundo, por eso en esta parte se divide en el tipo de combustible que en este caso será cascarilla de arroz que sería un recurso local, este nos dará una idea del diseño de la parrilla el cual es la base del combustible e ira dentro de la cámara de combustión. La tecnología está vinculada al tipo de gasificadores usados como para procesos de cocción, y después se seleccionará el más adecuado y económico a usar. Los materiales está vinculada al tipo que se va usar , en este caso será hecho por metal, existe casos que se usa arcilla, pero es usado para aplicaciones de menor potencia que el que se necesita, y por último están las habilidades del fabricante para la parte de la manufactura del equipo generador de gas.

Campo de aplicación

Por la gran cantidad de biomasa desperdiciada en el país este se puede utilizar para múltiples aplicaciones, tales como:

- Uso doméstico (casas), ej. Grupo electrógenos (cortos lapso de tiempo) o cocinas pequeñas, calentamiento de agua, calefacción.
- Uso comercial (restaurant , centro comercial , edificios): grupos electrógenos (largo lapso de tiempo) cocinas industriales, hornos de alimentos (panadería)
- Uso industrial Hornos industriales , calderos (quemador de biomasa) , industrias textiles , secado de ladrillos

A. Eficiencia del equipo

El proyecto está dirigido al uso comercial, especialmente a la zona de los comedores grandes, el objetivo es diseñar un equipo generador de gas que cumpla todas las especificaciones mecánicas y energéticas, como también cumplir con las expectativas del usuario, uno de los objetivos es que el equipo de cocina pueda competir con otros tipos de cocinas, tales como las de leña (mejorada), GLP, GN y kerosene. Por esto en el año 2004 el “*Tata Energy Research Institute (TERI)*” hizo un estudio de las diferentes cocinas, llegando a la siguiente conclusión

Tabla 3.1 Eficiencia de las diferentes cocinas [3.1]

Cocina	Eficiencia
Kerosene	40% - 45%
GLP y GN	60 % - 65%
LEÑA (Mejorada)	35% – 40%
Eléctricas	Mayores al 70%

Existe varias cocinas industrial de dos a tres quemadores usando como combustible la cascarilla de arroz, estas cocinas tienen una eficiencia entre 55 % a 60%, esto se desarrolló por el MJ Approtech, y además tiene una potencia de salida entre 13,5 kW a 17,6 kW, y un porcentaje de cenizas producido entre 29 % y 32% del total de cascarilla consumido. Este último era una desventaja de usar estos equipos, ya que varios años atrás las cenizas se tiraban al medio ambiente, contaminándolo; debido al gran porcentaje que genera hubo varios institutos que le dieron utilidad a este residuo, a continuación se detalla el uso de las cenizas generadas.

Aplicación de las cenizas de la cascarilla de arroz

- Estabilizante de suelos para pavimentos
- Es posible utilizarla como reemplazo parcial del cemento hasta en un 25%, teniendo el hormigón con cenizas un costo claramente menor que el hormigón tradicional.
- Fertilizantes
- Aislantes térmicos

3.1.3 Seguridad y salud

Esta parte trata sobre el cuidado que se debe tener al consumidor al diseñar, por eso se ve los riesgos al consumidor como a quemaduras, incendios y humos. Para el primero es necesario aislar la cámara de combustión por las altas temperaturas durante el proceso, para esto se instalará un material cerámico que mantendrá el calor en el interior, y por consiguiente la temperatura en la superficie será la adecuada para no causar lesiones al usuario, el segundo y tercero será controlado por una chimenea que tiene la función de evacuar los gases al ambiente mantenimiento a los ocupantes de un hogar seguro contra humo y gases nocivos.

3.1.4 Comodidad

Esta parte trata sobre la facilidad que se debe tener para el montaje (portátil), sistema de alimentación del combustible y el sistema para retirar las cenizas, para estos últimos la alimentación del combustible y el retiro de cenizas la operación debe ser manual, ya que como el equipo no está encendido todo el día o por varias horas.

3.2 Criterios de la selección del gasificador

Para la selección del tipo de gasificador se tendrá en cuenta los requerimientos del usuario (consumidor), para la construcción (criterios de diseño) y ambiental, esto se podrá observar en el anexo 1 donde se indicará lo que se desea obtener del equipo, de cada criterio mencionado anteriormente.

Para elegir si el gasificador será un downdraft, updraft o crossdraft más adecuado se tendrán en cuenta los parámetros que afectan al gasificador, esto se puede ver en la tabla 1.1 del anexo 1.

El siguiente procedimiento dará un puntaje de 4 puntos a 1 punto, dependiendo de la tabla 1.1, 1.2 y 1.3; siguiendo los criterios de la tabla 1.4, tabla 1.5 y 1.6 (observar tablas en el anexo 1), las primeras opciones tendrán un puntaje de 4 puntos, por ejemplo la opción A1 tiene un puntaje de 4 puntos y la opción A4 tiene un puntaje de 1 punto

Tabla 3.2 Selección del tipo de gasificador

		Gasificador		
		Downdraft	Updraft	Crossdraft
Potencia (30 kW)		4	2	4
Aplicación		4	3	3
Fabricación y montaje		3	3	3
Retiro de cenizas		3	3	3
Mantenimiento		3	3	3
Operatividad		3	3	3
Forma de alimentación		3	3	3
Transporte		4	4	4
Combustible	Preparación	3	4	2
	Tamaño	3	4	3
Seguridad	Contenido de tar	4	2	3
	Contenido de polvo	4	3	3
Eficiencia y costo		3	3	2
Estado de la tecnología		4	3	3
Puntaje		48	43	42

El gasificador óptimo para el uso de la cascarilla de arroz como combustible será un downdraft, ya que obtuvo un puntaje mayor a los demás tipos de gasificadores.

Referencias Bibliográficas

- [3.1] Tata Energy Research Institute
2005 *Efficiency Measurement of Biogas, Kererosene and LPG Stoves*,
Filipina. Consulta: 2 de junio del 2011
<http://www.snvworld.org/en/Documents/Efficiency_measurement_of_biogas_kerosene_and_LPG_stoves_Nepal_2001.pdf>
- [3.2] BASU, Prabir.
2006 *Combustion and gasification in fluidized beds*. Boca Raton, FL:
Taylor & Francis



CAPÍTULO 4 DISEÑO ENERGÉTICO Y MECÁNICO DE UNIDAD DE GENERACIÓN DE GAS

En este capítulo se desarrolla el diseño del equipo de generación de gas, este debe almacenar la cantidad de combustible necesario para la generación del gas para el proceso de cocción de alimentos, este componente se divide en tres partes, cámara de combustible, cámara de reacción, un sistema de enfriamiento del gas y la entrada del aire primario, además este equipo debe resistir las temperaturas de reacciones químicas que ocurren en el proceso para la generación del gas, para llegar al diseño del equipo se necesita el aire requerido para el proceso de gasificación, la cantidad de personas que acudirán al comedor, y además se debe tener en consideración las impurezas del gas a producir.

4.1. Partes del equipo

Las partes del equipo generador de gas son:

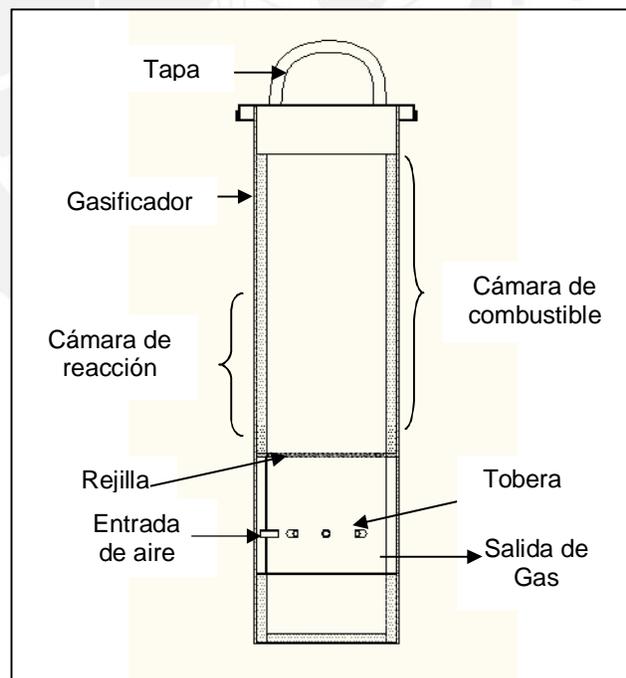


Figura 4.1 Salida Del gas

4.1.1. Cámara de combustible

Localizada sobre la cámara de reacción, este permite una fácil alimentación del combustible y se mantiene las temperaturas ideales del precalentamiento sobre el mismo. Sobre este se encuentra la tapa que dispone de un sello de agua situado entre la tapa y el gasificador, y que evita posibles fugas de gas a través del extremo superior de la cámara cuando el equipo se encuentra en operación, (Ver figura 4.2)

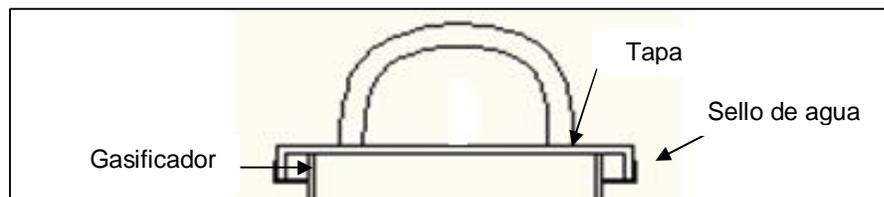


Figura 4.2 Sello de agua

4.1.2. Cámara de reacción

La cámara de reacción o reactor representa el corazón del equipo, ya que ahí es donde el gas producido es obtenido y posteriormente llevado al enfriador, para que luego se dirija a los quemadores, donde ocurre la combustión.

El combustible que se encuentra en la cámara de combustible cae por gravedad a la cámara de reacción y es detenida por una parrilla instalada en la parte final de la cámara de reacción. Las cenizas obtenidas del reactor pasan a través de la parrilla y son acumuladas en el fondo del equipo.

4.1.3. Entrada de aire primario

Mediante un ventilador (anexo 5) que otorga la cantidad de aire necesario para la gasificación, además de hacer circular el gas hacia el enfriador.

4.2. Aire requerido para el proceso de gasificación

Para obtener este valor es importante hallar primero la relación estequiométrica el cual es la cantidad de aire que proporciona el oxígeno estrictamente necesario para la oxidación completa de los elementos oxidables del combustible, luego este valor

se multiplica por la relación de equivalencia (0,3) [4.1] este valor es importante para dimensionar al gasificador.

4.2.1. Relación estequiométrica

Con el análisis elemental se puede hallar la composición química de la cascarilla de arroz este resultado se puede ver en la tabla 4.1, en este se puede observar el análisis en base seca y base recibida, con el primero se hallará la relación aire/combustible.

Tabla 4.1 Composición química de la cascarilla de arroz [4.2]

Ensayo	Base seca	Base recibida
Carbono	39,70%	35,55%
Hidrógeno	4,98%	5,63%
Oxígeno	35,22%	40,82%
Azufre	0,06%	0,06%
Cloruro	0,03%	0,03%
Nitrógeno	0,44%	0,40%
Cenizas	19,56%	17,51%
TOTAL	100%	100%

Como se puede ver, existen compuestos en una proporción ínfima como el nitrógeno y los sulfuros, y otros que son inertes en la reacción química de la combustión como las cenizas. Así que sólo se tendrán en cuenta el carbono, el hidrógeno y el oxígeno para obtener la fórmula química equivalente de la cascarilla de arroz, cuyos porcentajes se dividen por el peso molecular de cada uno para hallar su cantidad molar, las cuales aparecen en la siguiente tabla 4.2 (base seca).

Tabla 4.2 Composición molar de la cascarilla de arroz

Componente	Mol
Carbono	3,31
Hidrógeno	4,98
Oxígeno	2,20

Luego, se dividen estas cantidades por la del carbono para poder ver la diferencia entre este y la composición química de la biomasa ($\text{CH}_{1,4}\text{O}_{0,6}$), el cual se puede observar a continuación y se nota que la composición química para la reacción de combustión es aproximada.



A continuación se mostrará la ecuación a utilizar para hallar la relación estequiométrica, cuando existe la combustión ideal con aire, los compuestos que se forman son el CO_2 , H_2O y el N_2 , luego se halla el valor de "a" que es la cantidad molar estequiométrica del aire, esto se hará mediante el balance atómico de cada uno de los elementos presentes en los compuestos de la reacción.



$$\text{C} \longrightarrow b = 1$$

$$\text{H} \longrightarrow c = 0,75$$

$$\text{O} \longrightarrow a = 1,45$$

$$\text{N} \longrightarrow d = 3,93$$

Con el valor de "a" se halla el valor de la $r_{a/c}$,

$$r_{a/c} = \frac{1,045 \times (16 \times 2 + 3,76 \times 2 \times 14)}{12 + 1,5 + 0,66 \times 16} = 5,96 \frac{\text{kg de aire}}{\text{kg de combustible}}$$

De este valor se considera solo el 30% [4.3] para la gasificación que será

$$1,80 \frac{\text{kg de aire}}{\text{kg de combustible}}$$

4.3. Procedimiento para el diseño del gasificador

A continuación se presentan algunos parámetros importantes que deben ser en cuenta para determinar el tamaño del gasificador y otros componentes, teniendo en cuenta la potencia de salida deseada. Los siguientes parámetros y sus

ecuaciones que se mostraran a continuación sirven como requisito básico en el diseño de una cocina que usa como combustible la cascarilla de arroz:

4.3.1. Energía necesaria

Esto se refiere a la cantidad de calor necesario que se debe suministrar a la cocina, esto puede ser determinado basándose en la cantidad comida que se va a cocinar o a la cantidad de agua total a hervir, investigaciones pasadas recomiendan que por cada persona se necesita 0,25 kW. [4.4]

4.3.2. Flujo de combustible

Esta es la cantidad de combustible que se consume en el funcionamiento de la estufa por unidad de tiempo. Esto se determina con la siguiente ecuación [4.5].

$$\dot{m} = \frac{3\,487,77 \times Q_n}{P_c \times \eta} \dots\dots\dots (\text{ec. 4.1})$$

\dot{m} : Flujo másico del combustible (kg/h)

Q_n : Potencia del gasificador (kW)

P_c : Poder calorífico del combustible (kJ/kg)

η : Eficiencia del gasificador

4.3.3. Diámetro del reactor

Este valor se halla con la siguiente ecuación [4.6].

$$D = \left(\frac{1,27 \times \dot{m}}{S_{gr}} \right)^{0.5} \dots\dots\dots (\text{ec. 4.2})$$

D: Diámetro del gasificador (m)

\dot{m} : Flujo másico (kg/h)

S_{gr} : Relación específica gasificación de la cascarilla de arroz (110-120 kg/m²-h)
[4.7]

4.3.4. Altura del reactor

Esto se refiere a la distancia total, desde la parte superior hasta el extremo inferior del reactor. Esto determina con la siguiente ecuación [4.8]:

$$H = \frac{S_{GR} \times T}{\rho_c} \dots\dots\dots (ec. 4.3)$$

H: Altura del reactor (m)

S_{gr} : Relación específica gasificación de la cascarilla de arroz (110-120 kg/m²-h) [4.9]

ρ_c : Densidad de la cascarilla de arroz (kg/m³)

T: Tiempo requerido para el consumo del combustible (h)

4.3.5. Tiempo de consumo del combustible

Esto se refiere al tiempo total requerido para gasificar completamente el combustible (cascarilla de arroz) dentro del reactor. Esto incluye el tiempo para encender el combustible y el tiempo de generación de gas, más el tiempo para quemar todo el combustible en el reactor. Esto se calcula mediante la siguiente ecuación [4.10].

$$T = \frac{\rho \times V_r}{\dot{m}} \dots\dots\dots (ec. 4.4)$$

T: Tiempo requerido para el consumo de la cascarilla de arroz (h)

V_r: Volumen del gasificador (m³)

ρ_c : Densidad de la cascarilla de arroz (kg/m³)

ṁ: Flujo másico (kg/h)

4.3.6. Cantidad de aire necesario para la gasificación

Esto se refiere a la proporción de flujo de aire necesario para gasificar cascarilla de arroz. Esto es importante para determinar el tamaño del ventilador necesario para

gasificar la cascarilla de arroz. . Esto se calcula mediante la siguiente ecuación [4.11].

$$Q_a = \frac{\Phi \times \dot{m} \times A_e}{\rho_a} \dots\dots\dots (\text{ec. 4.5})$$

Q_a : Flujo de aire (m^3/h)

\dot{m} : Flujo másico (kg/h)

Φ : Relación de equivalencia (se recomienda que sea 0,3) [4.12]

A_e : Aire estequiométrico

ρ_a : Densidad del aire ($1,23 \text{ kg}/\text{m}^3$ al nivel del mar)

4.3.7. Velocidad superficial

Esta es la velocidad del aire a lo largo del lecho del reactor. Esto se refiere a la velocidad del aire en la cama de combustible, esto hace que se formen canales en el lecho, que pueden afectar en gran medida la gasificación. Esto se halla con la siguiente ecuación.

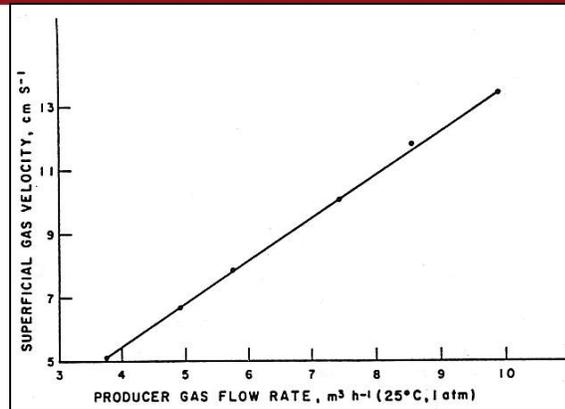
$$V_s = \frac{4 \times Q_a}{\pi \times D^2} \dots\dots\dots (\text{ec. 4.6})$$

V_s : Velocidad superficial del gas (m/s)

Q_a : Flujo de aire (m^3/h)

D : Diámetro del gasificador (m)

Con este valor se puede entrar a la grafica 4.1 para conocer la producción de gas (m^3/h)



Gráfica 4.1. Velocidad superficial versus caudal producido del gas [4.13]

A continuación se muestra un ejemplo de cálculo, en el anexo 2. se muestra diferentes cálculos para diferentes eficiencias del equipo

Caso: Cocinar para 100 personas

1. Potencia necesaria

- Potencia = $100 \times 0,25 = 25 \text{ kW}$

2. Flujo de combustible

- Poder calorífico es $12\,924 \text{ kJ/kg}$
- Potencia necesaria es 25 kW
- Eficiencia se asume 60% (también se realizó para eficiencias mayores)

Se tiene que el flujo de combustible es $11,61 \text{ kg/h}$

3. Diámetro del reactor

- Flujo de combustible es $11,25 \text{ kg/h}$
- Relación específica de gasificación se asume 100 kg/h-m^2 [4.14]

Se tiene que el diámetro es de $0,38 \text{ m}$

4. Altura del reactor

- Relación específica de gasificación se asume 100 kg/h-m^2
- Tiempo requerido para el consumo de la cascarilla 1 hora
- Densidad del combustible es 110 kg/m^3

Se tiene que la altura es de 0,91 m.

5. Tiempo requerido para el consumo de la cascarilla

- Volumen del reactor $0,073 \text{ m}^3$ (volumen de un cilindro)
- Densidad del arroz 110 kg/m^3
- flujo de combustible $11,61 \text{ kg/h}$

Se tiene que el tiempo requerido para el consumo de la cascarilla es de 1 hora.

6. Caudal del aire necesario para la gasificación

- Relación de equivalencia 0,3 (se recomienda)
- Aire estequiométrico $5,96 \text{ kg de aire/kg de fuel}$
- Densidad del aire $1,23 \text{ kg/m}^3$
- Flujo de combustible $11,61 \text{ kg/h}$

Se tiene que el caudal necesario de aire para la gasificación es de $16,87 \text{ m}^3/\text{h}$.

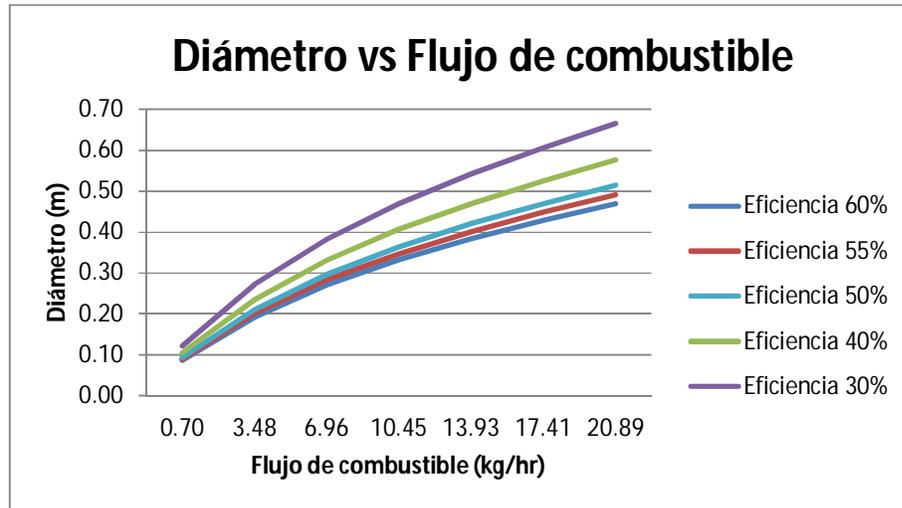
7. Velocidad superficial

- Caudal del aire necesario para la gasificación $20,25 \text{ m}^3/\text{h}$
- Diámetro 0,42 m

Se tiene que la velocidad superficial es de $4,05 \text{ cm/s}$.

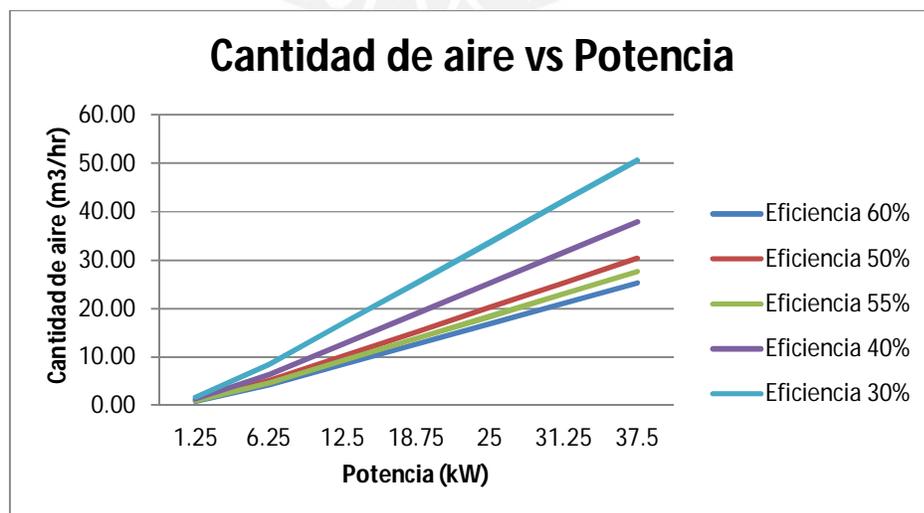
Como se aplicó para varios casos, a continuación se muestran gráficas donde se observan diferentes curvas para diferentes eficiencias de la cocina.

En la gráfica 4.2 se puede observar que al aumentar el flujo de combustible, el diámetro aumenta, también se puede concluir que para una misma cantidad de flujo de combustible se tiene un diámetro mayor para la eficiencia más baja, y un diámetro menor para la eficiencia más alta.



Grafica 4.2. Diámetro vs Flujo de combustible

En la gráfica 4.3 se puede observar como varía la cantidad necesaria de aire para la gasificación con la potencia para diferentes eficiencias, se puede concluir que se necesita una mayor cantidad de aire para obtener una mayor potencia, y además que para obtener la misma potencia, se necesita una mayor cantidad de aire para la eficiencia más baja.



Grafica 4.3 Cantidad de aire vs Potencia

4.3.8. Espesor del reactor

Para calcular el espesor mínimo requerido se utilizará el procedimiento de la norma ASME Sec. VIII Div. 1 – *Pressure Vessels*, como se tiene una junta de soldadura longitudinal se usará la siguiente fórmula:

$$t_{e.p} = \frac{P \times r_i}{S \times E - 0,6 \times P} \dots\dots\dots (\text{ec. 4.7})$$

Donde:

$t_{e.p}$: Espesor del reactor (mm)

P: Presión interna del reactor (bar)

r_i : Radio interno del reactor (mm)

S: Esfuerzo máximo permitido (bar)

E: Eficiencia de la soldadura (observar figura 4.3)

La presión interna en el reactor es de 1.22 bar (ver solución en la pagina -), el radio interno del reactor es de 177 mm, el esfuerzo máximo permitido se hallará de las tablas del anexo 4, donde se tiene que para el material SA 36 a una temperatura en la superficie del reactor de 28 °C (observar anexo 3) un esfuerzo máximo permitido de 16 600 psi (1 103,16 bar); y finalmente la eficiencia de la soldadura se obtiene de la figura – , como el reactor será una plancha metálica estructural rolada la soldadura será a tope unión simple sin solera de respaldo, se elige una eficiencia de la soldadura de 0.6.

Con los datos anteriores se obtiene que el espesor mínimo de la plancha metálica estructural es de 0.33 mm con lo cual se elige el espesor nominal comercial de 3 mm (el mínimo en el mercado).

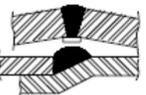
TIPOS DE UNIONES NORMA UW-12		EFICIENCIA DE LA UNION CUANDO LA JUNTA ESTA RADIOGRAFIADA		
		AL 100 %	POR PUNTOS	SIN
	SOLDADURA A TOPE UNIDA CON SOLDADURA POR AMBOS LADOS, O BIEN POR OTRO METODO CON LO CUAL SE OBTENGA LA MISMA CALIDAD DEL METAL DE APORTE EN AMBOS LADOS DE LA SUPERFICIE SOLDADA. SI SE USA LA SOLERA DE RESPALDO, DEBERA QUITARSE DESPUES DE APLICAR LA SOLDADURA Y ANTES DE RADIOGRAFIAR.	1.00	0.85	0.70
	SOLDADURA SIMPLE A TOPE CON SOLERA DE RESPALDO LA CUAL PERMANECERA EN EL INTERIOR DEL RECIPIENTE.	0.90	0.80	0.65
	UNION SIMPLE POR UN SOLO LADO SIN SOLERA DE RESPALDO	---	---	0.60
	UNION TRASLAPADA CON DOBLE FILETE	---	---	0.55
	UNION TRASLAPADA CON FILETE SENCILLO Y TAPON DE SOLDADURA	---	---	0.50
	UNION TRASLAPADA CON FILETE SENCILLO SIN TAPON DE SOLDADURA	---	---	0.45

Figura 4.3. Eficiencia de la soldadura [4.15]

4.3.9. Transferencia de calor en el gasificador

En el interior del gasificador ocurre la formación del gas pobre, en este proceso ocurren reacciones químicas (ver capítulo 2), y la temperatura media de reacción es aproximadamente 1 000 °C, los procesos de transferencia de calor que ocurren serían las de radiación por las paredes, radiación por gases, convección interna por el gas y externa por el aire, y conducción por el refractario y plancha metálica. A continuación vemos el circuito térmico para la pared compuesta (grafica 4.3), y en la figura 4.4 se puede observar el diseño del gasificador (plancha metálica y aislante térmico), y en la figura 4.5 un detalle de los parámetros más importantes para hallar la transferencia de calor.

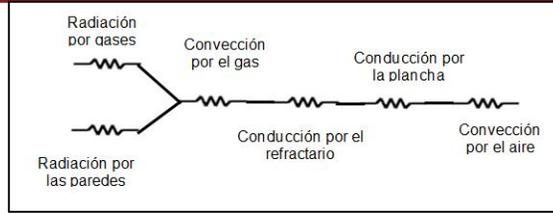


Figura 4.4. Diagrama de Resistencia Térmica

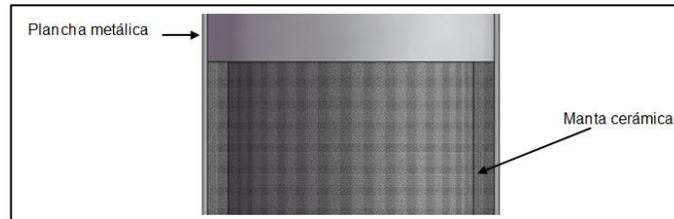


Figura 4.5. Gasificador compuesto de una plancha metálica y la manta cerámica

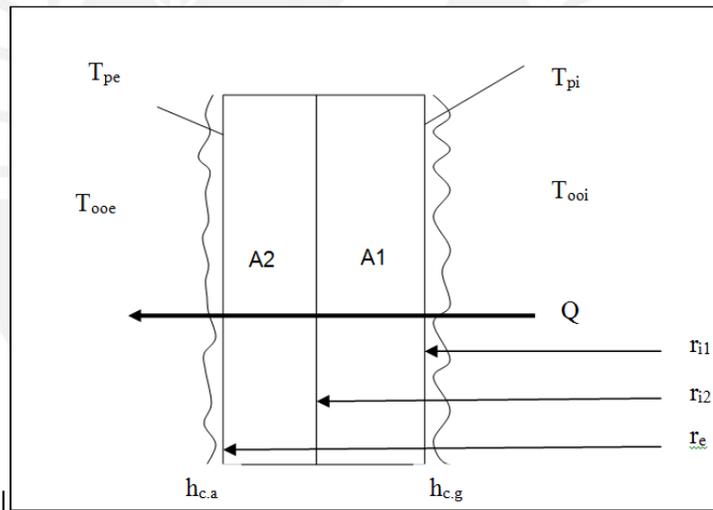


Figura 4.6. Parámetros Principales

T_{ooe} : Temperatura del medio ambiente (30°C)

T_{ooi} : Temperatura interna del gasificador (aproximadamente 800°C)

T_{pe} : Temperatura de la pared externa (plancha metálica)

T_{pi} : Temperatura de la pared interna (manta cerámica)

$h_{c,a}$: Coeficiente convectivo del aire

$h_{c,g}$: Coeficiente convectivo del gas

Q : Calor transferido ($Q_{rad,gas} + Q_{rad,Pared} + Q_{cond,yconvec.}$)

r_e : Radio externo

- r_{i1} : Radio interno del gasificador
- r_{i2} : Radio externo de la primera pared (A1)
- A_1 : Aislante térmico
- A_2 : Plancha metálica

Primero se tiene los siguientes datos:

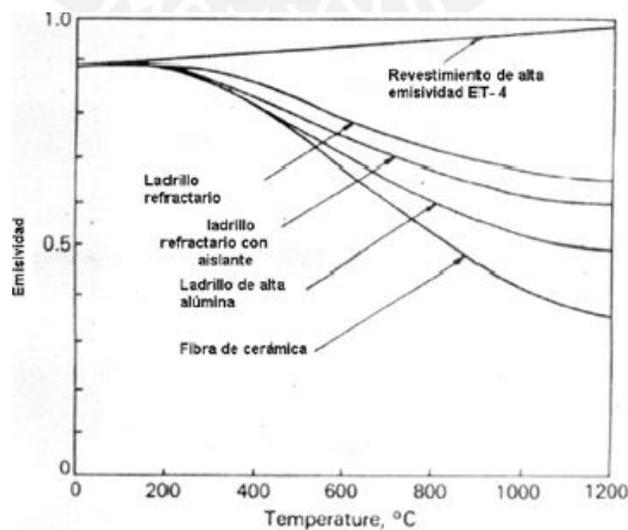
- Temperatura del gas (T) es de 800° C aproximadamente.
- Peso molecular (\bar{M}) del gas es 22,84 g/mol
- Densidad del gas es 0,33 g/l (ρ_g)
- Constante universal de gases (R) que es $0,082 \frac{atm \times l}{K \times mol}$

Por la ecuación de los gases ideales son:

$$P \times \bar{M} = \rho_g \times T \times R \dots\dots\dots (ec. 4.7)$$

Con estos valores se tiene la presión total (P) del gas 1.1 atm (1.12 bar).

Teniendo este valor se puede comenzar a calcular la radiación por las paredes y gases. Como se usa una manta cerámica como aislante y refractario, se tiene la gráfica 4.4 para observar la emisividad:



Gráfica 4.4. Emisividad del aislante

Para la fibra cerámica se tiene que la emisividad es aproximadamente 0,4 y la temperatura media de la pared es de 600 °C y la temperatura media del gas es de 800 °C.

A diferencia de los sólidos, los gases presentan espectros discontinuos o, como en el caso del O₂ y del N₂, son transparentes a la radiación. En la radiación de las llamas y productos de la combustión tiene interés los comportamientos del vapor de agua y del dióxido de carbono.

Para esto se va aplicar las fórmulas de Schack, las cuales son:

$$Q_{CO_2} = 4,07 \cdot (\sqrt[3]{p \cdot s}) \left(\frac{T}{100}\right)^{3,5} \dots\dots\dots (ec. 4.8)$$

$$Q_{H_2O} = 4,07 \cdot p^{0,8} \cdot s^{0,6} \left(\frac{T}{100}\right)^3 \dots\dots\dots (ec. 4.9)$$

Donde p es la presión parcial de gas en bar y s el espesor medio de la capa gaseosa en metros. (Tabla 4.4)

Las fórmulas anteriores tienen el inconveniente teórico de que en la transferencia entre los gases y una pared, no puede utilizarse la ley de la cuarta potencia. En la práctica lo que se hace es tomar, en vez de la pared, el propio gas a la temperatura de la pared, con lo que se tiene:

$$Q = Q_g - Q_p \dots\dots\dots (ec. 4.10)$$

Qg: Calor de transferencia del gas

Qp: Calor de transferencia de la pared

La fórmula anterior tiene que ver con la transferencia por radiación entre la pared y el gas, este último que se encuentra a una temperatura mayor transfiriere calor a la pared, este hace lo mismo con el gas, por eso se resta la transferencia neta por radiación, como la temperatura en la pared del cilindro es constante la radiación de pared a pared es nulo [4.16]. A continuación se muestra factores para el cálculo por radiación.

Tabla 4.3 Factores para el cálculo de espesores útiles de radiación en configuraciones geométricas frecuentes [4.17]

Forma geométrica	Dimensión D	Factor (s)
Cilindro de longitud infinita	Diámetro	0,90
Cilindro circular recto, de diámetro igual a la altura, que irradia hacia el centro de la base	Diámetro	0,72
Cilindro circular recto, de diámetro igual a altura, irradiando a toda la superficie	Diámetro	0,60
Cilindro infinito, sección semicircular	Radio	1,26
Dos planos paralelos infinitos	Separación arista	1,80

Con la composición del gas y por la ley de Dalton o presiones parciales se tiene que:

Tabla 4.4 Composición del gas pobre a 1000 °C [4.18]

Producto	% volumen
CO	26,10
CO ₂	6,60
H ₂	20,60
H ₂ O	8,60
CH ₄	0,00
N ₂	38,10

- Presión de CO₂ es igual a 1,12 bar x 6.60% (volumen) = 0,0739 bar
- Presión de H₂O es igual a 1,12 bar x 8.60 % (volumen) = 0,0963 bar

$$Q_{CO_2} = 4,07 \sqrt[3]{(0,0739)(0,9)} \left(\frac{1000}{100}\right)^3 = 1702,3 \frac{W}{m^2}$$

$$Q_{H_2O} = 4,07 \times 0,0963^{0,8} \times 0,9^{0,6} \left(\frac{1000}{100}\right)^3 = 629,64 \frac{W}{m^2}$$

Aplicando nuevamente las fórmulas a la temperatura de la pared:

$$Q_{CO_2} = 4,07 \sqrt[3]{(0,0813)(0,9)} \left(\frac{800}{100}\right)^3 = 871,59 \frac{W}{m^2}$$

$$Q_{h_2o} = 4,07 \times 0,105^{0,8} \times 0,9^{0,6} \left(\frac{800}{100}\right)^3 = 322,37 \frac{W}{m^2}$$

La transferencia neta es $1\ 137,98 \frac{W}{m^2}$, como el área del cilindro es $1,70 m^2$

El calor transferido total es $1\ 930,54 W$

Ahora se tiene halla el calor transferido por conducción o convección:

$$Q = \frac{T_{o1i} - T_{o1e}}{R_{tubo} + R_{aisl.} + R_{hc.a} + R_{hc.g}} \dots\dots\dots (ec. 4.11)$$

O también se puede resumir a

$$= \frac{T_{pi} - T_{o1e}}{R_{tubo} + R_{aisl.} + R_{hc.a}} \dots\dots\dots (ec. 4.12)$$

Cada Resistencia es igual a:

$$R_{tubo} = \frac{\ln \frac{r_e}{r_{i2}}}{2 * \pi * K_t * L} \dots\dots\dots (ec. 4.13)$$

R_{tubo} : Resistencia del tubo (K/W)

r_e : Radio externo (mm)

r_{i2} : Radio interno del aislante térmico (mm)

K_t : Conductividad térmica de la plancha metálica (W/m-K)

L : Longitud del gasificador (m)

$$R_{aisl.} = \frac{\ln \frac{r_{i2}}{r_{i1}}}{2 * \pi * K_a * L} \dots\dots\dots (ec. 4.14)$$

$R_{aisl.}$: Resistencia del aislante (K/W)

K_a : Conductividad térmica del aislante (W/m-K)

r_{i1} : Radio interno del gasificador (mm)

r_{i2} : Radio externo del aislante térmico (mm)

L: Longitud del gasificador (m)

$$R_{hc.a} = \frac{1}{2 * \pi * r_e * hc.a * L} \dots\dots\dots (ec. 4.15)$$

$R_{hc.a}$: Resistencia del aire (K/W)

$hc.a$: Coeficiente convectivo del aire (W/m²-K)

r_e : Radio externo (m)

L: Longitud del gasificador (m)

A continuación se hace un caso para un espesor de aislante 1” pulgada, en este caso se usa un manta cerámica (ver propiedades en el anexo 6.), ya que este sirve como refractario (protección a la plancha metálica) y como aislante, en el anexo 3. se realiza cálculos con espesores diferentes.

Datos:

Altura (m)	1,50
Diámetro (m)	0,36
Conductividad térmica del acero (W/m-K)	15
Conductividad térmica del aislante (W/m-K)	0,15
Coeficiente convectivo del aire (W/m ² -K)	11
Temperatura Interna (°C)	800
Temperatura externa (°C)	35

Primero hallamos la resistencia del aislante, los datos lo remplazamos en la ecuación 4.15 se tiene:

$$R_{aisl.} = 0,093 \text{ K/W}$$

Luego la resistencia del tubo metálico y la resistencia del aire, con la ecuación 12 y 14 respectivamente, los valores que se obtienen son:

$$R_{tubo} = 0,00010 \text{ K/W}$$

$$R_{hc.a} = 0,046 \text{ K/W}$$

Ahora se halla la transferencia de calor por conducción o convección donde se obtiene:

$$Q = 5\,473,67 \text{ W}$$

A este valor se le suma el hallado por radiación y se obtiene el calor total transferido (Q_t) es:

$$Q_t = 7\,404,21 \text{ W}$$

Ahora se tiene que verificar que la temperatura en la pared del gasificador es la adecuada para el usuario:

$$Q_t = \frac{T_{ooi} - T_s}{R_{tubo} + R_{aisl}} \dots\dots\dots (4.16)$$

Donde:

Q_t : Calor Transferido total (W)

T_{ooi} : Temperatura interna del gasificador (°C)

T_s : Temperatura en la superficie (°C)

R_{tubo} : Resistencia del tubo (K/W)

$R_{aisl.}$: Resistencia del aislante (K/W)

De este se obtiene que la temperatura en la pared externa (plancha metálica) es de 107,90°C, en el anexo 3 se hace una tabla para diferentes espesores de aislamiento hasta obtener una temperatura adecuada para el usuario.

4.4. Consideraciones para el gas de salida

Uno de los problemas más importantes para usar el gas pobre en los quemadores es la obstrucción por las impurezas que se encuentran en el gas. En general, estas impurezas pueden causar serios problemas en la operación o manipulación de la cocina, y están dadas por la cantidad de tar (alquitranes) y el diámetro de la

partícula de carbón; este último si es mayor al diámetro del agujero del quemador ocurrirá una obstrucción y dificultará el flujo de combustible. Por eso, para brindar una mejor calidad del gas es necesario calcular el diámetro de la partícula, la cantidad de polvo y el contenido de tar.

4.4.1. Diámetro de la partícula

Como se mencionó anteriormente, es importante hallar el diámetro de la partícula para comparar con el diámetro del agujero, para calcular el tamaño de la partícula se debe tener las siguientes consideraciones [4.19]:

- a) La partícula es esférica y rígida, y no existe deslizamiento entre la partícula y el gas.
- b) El gas es homogéneo
- c) La velocidad de sedimentación es tan baja que todos los efectos de la inercia son despreciables.
- d) El flujo es laminar

Con estas suposiciones se puede calcular la velocidad y el diámetro de la partícula, para esto se usan las siguientes formulas [4.20]:

$$d_p < \left(\frac{3,6 v^2}{(\rho_s - \rho_g) \cdot \rho_g \cdot g} \right)^{\frac{1}{3}} \dots \dots \dots (ec. 4.17)$$

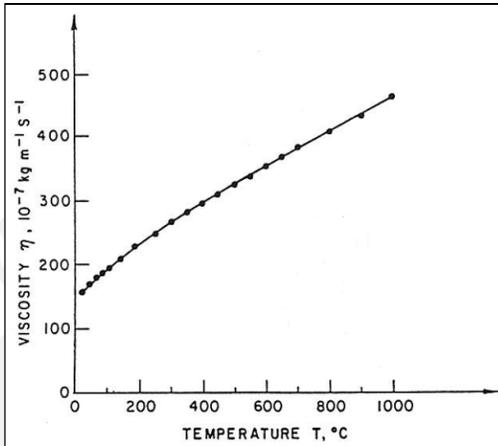
- d_p : Diámetro de la partícula (μm)
- μ : Viscosidad promedio ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$.)
- ρ_g : Densidad del gas ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$.)
- ρ_s : Densidad del carbón de la cascarilla de arroz ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$.)
- g : gravedad ($9.81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$)

$$V_t = \frac{(\rho_s - \rho_g) \cdot g \cdot d^2}{18 \cdot \mu} \dots \dots \dots (ec. 4.18)$$

- V_t : Velocidad terminal de la partícula ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
- d : Diámetro de la partícula (μm)
- μ : Viscosidad promedio ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$.)
- ρ_g : Densidad del gas ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$.)
- ρ_s : Densidad del carbón de la cascarilla de arroz ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$.)

g: gravedad ($9,81 \text{ m.s}^{-2}$)

Para calcular el tamaño de la partícula se asume que la temperatura de salida de los gases es de $400 \text{ }^{\circ}\text{C}$ con este valor y la gráfica 4.5 se puede obtener la viscosidad (ν) que será $256 \times 10^{-7} \text{ kg.m}^{-1} .\text{s}^{-1}$.



Gráfica 4.5. Viscosidad del gas versus temperatura [4.21]

Suponiendo que el gas se comporta de acuerdo a la ley del gas ideal, se calcula la densidad del gas (ρ_g) el cual es $0,33 \text{ kg.m}^{-3}$ [4.22], la densidad del carbón de la cascarilla de arroz (ρ_s) se encuentra entre $2,0 - 2,3 \text{ g.cm}^{-3}$ (se asume $2,0 \text{ gr.cm}^{-3}$) [4.23], entonces a velocidad terminal de la partícula se calcula usando el teorema de Stokes si $Re < 0,2$.

Datos:

ν : $356 \times 10^{-7} \text{ kg.m}^{-1} .\text{s}^{-1}$.

ρ_s : $2,00 \text{ gr.cm}^{-3}$

ρ_g : $0,33 \text{ kg. m}^{-3}$

g: $9,81 \text{ m.s}^{-2}$

Se obtiene que el diámetro es $d < 85 \text{ }\mu\text{m}$, y por consiguiente; la velocidad terminal es $V_t = 0,25 \text{ m.s}^{-1}$, pero este es la velocidad con el que se movería una partícula de $85 \text{ }\mu\text{m}$, sin embargo la velocidad del gas es de $4,48 \text{ cm/s}$ (ver anexo 3), con esta velocidad se tiene un tamaño de partícula de $38,25 \text{ }\mu\text{m}$.

Ahora se comprueba si $Re < 0,2$ con la fórmula

$$Re = \frac{\rho_g \cdot V_t \cdot d}{\mu} \dots\dots\dots (ec. 4.19)$$

V_t : Velocidad terminal de la partícula ($m \cdot s^{-1}$)

d : Diámetro de la partícula (m)

μ : Viscosidad promedio ($kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$.)

ρ_g : Densidad del gas ($kg \cdot m^{-3}$.)

$$Re = 0,016 < 0,2 \text{ (cumple)}$$

En caso de que Re sea mayor a 0,2 se tiene que realizar lo siguiente:

En caso de que $0,2 < Re < 500$ se tiene que hallar el coeficiente de arrastre.

$$C_d = \frac{24}{Re} \cdot (1 + 0,15 Re^{0,687}) \dots\dots\dots (ec. 4.20)$$

C_d : Coeficiente de arrastre

En caso de que $Re > 500$

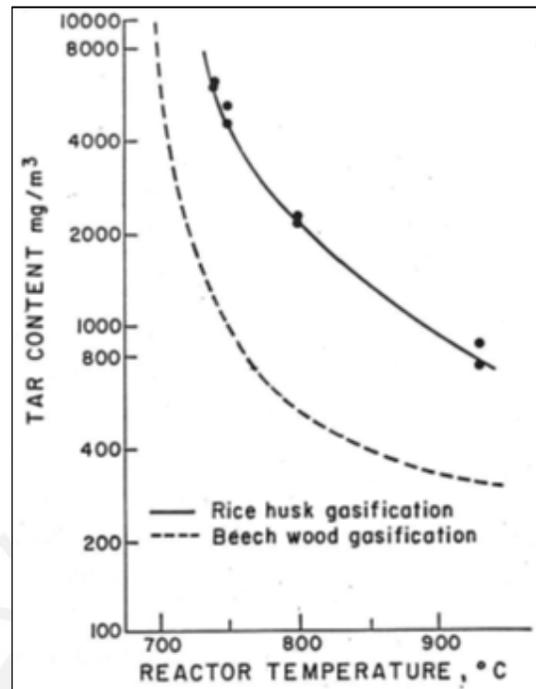
$$C_d = 0,44$$

Con la siguiente fórmula se tiene una relación entre el diámetro (d) y la velocidad terminal (V_t)

$$C_D \cdot \frac{d^2}{4} \cdot \rho_g \cdot \frac{V_t^2}{2} = \frac{\pi}{6} \cdot (\rho_g - \rho_s) \cdot g \cdot d^3 \dots\dots\dots (ec. 4.21)$$

4.4.2. Cantidad de Tar

El tar es un líquido producido en el proceso de pirolisis, y contiene alquitranes y vapores condensables, este líquido se va eliminado con el aumento de la temperatura, en los gasificadores tipo updraft existen mayores dificultades con este, con los downdraft existe una menor dificultad, pero igual podría causar problemas, no existe una fórmula para hallar la cantidad de tar, esto se realiza mediante experimentos, estos resultados dieron la gráfica 4.6 que se muestra a continuación:



Gráfica 4.6 Contenido de tar vs Temperatura del reactor [4.23]

En la gráfica 4.10 se puede observar como varía la cantidad de tar con el aumento de la temperatura, como la temperatura del reactor es aproximadamente entre 750 °C a 800°C, se tiene un contenido de tar de 1 000 mg/m³ a 400 mg/m³. Por esta razón y por el tamaño de la partícula es necesario tener un depurador de gases.

4.4.3. Contenido de partículas en la producción del gas

No existen datos exactos sobre el contenido de partículas, sin embargo existe especificaciones que dependiendo de la aplicación existen un mínimo, pero estas especificaciones solo son para aplicaciones industriales, como por ejemplo en uso de motores el máximo permitido es de 10 mg/Nm³ de polvo [4.24], para aplicaciones comerciales se tiene que el contenido de polvo es moderado en los gasificadores de tipo downdraft.

4.5. Soporte del gasificador

El soporte del gasificador tiene la función de dar estabilidad al equipo, evitando el volteo, este está compuesto por una plancha metálica cilíndrica de igual diámetro

que el gasificador que será soportado por 4 perfiles L de 20 mm x 20 mm x 2 mm, material A36, altura de 50 mm y cada una soldada en el extremo con placas de 70 mm x 70 mm x 3 mm, y estas ancladas al piso con espárragos M6x100mm. (Observar figura 4.6 y plano desarrollado)

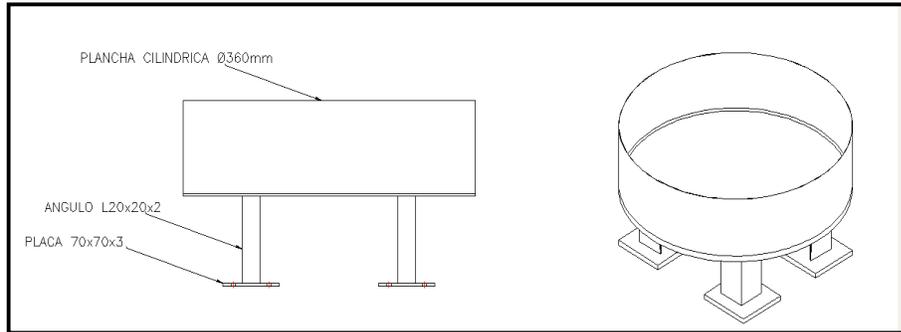


Figura 4.7 Soporte del Gasificador

A continuación se verifica que los perfiles en L puedan soportar el peso del equipo más el peso del combustible, en la tabla 4.5 se puede observar el peso del equipo.

Tabla 4.5 Peso del equipo más peso del combustible

Gasificador		
Ítem	Partes del Equipo	Peso (kg)
1	Gasificador	42,00
2	Manta Cerámica	4,50
3	Tapa del Gasificador	6,00
4	Peso del combustible	15,00
5	Otros	2,00
	Peso total	68,50

Como los perfiles en L solo soportan esfuerzo por compresión se calcula el esfuerzo producido por peso del equipo más el peso del combustible, que sería:

$$\sigma_c = \frac{W_e}{A_c} \dots\dots\dots (ec. 4.22)$$

σ_c : Esfuerzo de Compresión (kgf/cm^2)

W_e : Peso total del Equipo (kg)

A_c : Área de contacto (cm^2)

El área de contacto sería el área del perfil en L multiplicado por la cantidad de perfiles, que sería:

$$A_c: 0,73 \text{ cm}^2 \times 4$$

$$A_c: 2,92 \text{ cm}^2$$

Entonces el esfuerzo de compresión sería:

$$\sigma_c = \frac{68,5}{2,92}$$

$$\sigma_c = 23,46 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$$

Además se coloca un factor de seguridad de 1.2 se obtiene que el esfuerzo de compresión sería de $28,15 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$ comparando con el esfuerzo de compresión máxima del perfil L, se obtiene:

$$3\,500 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} > 28,15 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$$

Se concluye que no existen problemas de ruptura por compresión con el perfil en L elegido, a continuación se verificará que no ocurra falla por pandeo, para esto se usará el método omega [4.25].

El perfil elegido tiene las siguientes características:

$$A_c: 0,73 \text{ cm}^2$$

$$I_n: 0,589 \text{ cm}$$

$$I_x: 0,268 \text{ cm}^2$$

$$L_p: 5 \text{ cm}$$

Dónde:

A_c : Área de la sección transversal del perfil (cm^2)

I_n : Radio de giro del perfil (cm)

I_x : Momento de Inercia (cm^2)

L_p : Longitud del perfil (cm)

Ahora se halla el grado de esbeltez (λ) que es:

$$\lambda = \frac{L_p}{I_x} \dots \dots \dots (ec. 4.23)$$

$$\lambda = 18,66$$

Luego con este grado de esbeltez se encuentra el valor omega (ω) en la siguiente tabla.

$$\omega = 1,04$$

Como cada perfil aguantará $23,46 \text{ kgf/cm}^2$, este valor será multiplicado por el valor omega, para este método se establece un nivel de referencia constante (σ_{Fadm}) la cual deberá ser mayor al hallado.

$$\omega \times \sigma_c < \sigma_{Fadm}$$

ω : Coeficiente de omega

σ_{Fadm} : Esfuerzo de fluencia admisible ($1\ 400 \text{ kgf/mm}^2$ para acero A-36) [4.26]

σ_c : Esfuerzo de Compresión (kg/cm^2)

Al final se obtiene:

$$1\ 400 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} > 29,27 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

Se concluye que el esfuerzo de pandeo es insignificante respecto al esfuerzo de fluencia admisible, lo cual no generará problema alguno con el perfil elegido.

Referencias bibliográficas del capítulo 4

- [4.1] BELONIO Alexis T.
2005 *Rice husk gas stove handbook*. Iloilo Consulta: 2 de junio del 2012
<http://www.bioenergylists.org/stovesdoc/Belonio/Belonio_gasifier.pdf>
- [4.2] AGUSTIN VALVERDE, BIENVENIDO SARRIA y José MONTEAGUDO
2007 *Análisis comparativo de las características fisicoquímicas de la cascarilla de arroz*. Colombia. Consulta: 15 de julio del 2012
<<http://www.slideshare.net/segundocorreamorán/cascarilla-de-arroz>>
- [4.3] BELONIO, op. cit.
- [4.4] Ibíd.
- [4.5] Ibíd.
- [4.6] Ibíd.
- [4.7] Ibíd.
- [4.8] Ibíd.
- [4.9] Ibíd.
- [4.10] Ibíd.
- [4.11] Ibíd.
- [4.12] Ibíd.
- [4.13] KAUPP, Albrecht
1984 *Gasification of rice hulls: theory and practice*. Primera edición.
Braunschweig ; Wiesbade: Vieweg
- [4.14] BELONIO, op. cit.
- [4.15] LEON, Juan
2001 *Diseño y cálculo de recipientes a presión*, Primera edición
Inglesa; Lima
- [4.16] MARQUEZ, Manuel
2005 *Combustión y quemadores*, Primera edición. España:
Marcombo
- [4.17] Ibíd.
- [4.18] KAUPP, op. cit.

[4.19] *Ibíd.*

[4.20] *Ibíd.*

[4.21] *Ibíd.*

[4.22] *Ibíd.*

[4.23] *Ibíd.*

[4.24] *Ibíd.*

[4.25] RODRIGUEZ H., Jorge
2008 *Resistencia de materiales 2.* Lima: PUCP

[4.26] *Ibíd.*



CAPÍTULO 5 DISEÑO DE LA UNIDAD DE EMPLEO DE GAS GENERADO

Este capítulo trata sobre las consideraciones a tener en cuenta para el uso del gas generado para usarlo en procesos de cocción, por lo observado en el capítulo anterior el gas generado es sucio y caliente, por tal razón se podrá observar los sistemas de limpieza y enfriamiento del gas a utilizarse, luego se abarcará el tema sobre los quemadores comerciales usados en los procesos de cocción, y en caso de no poder utilizarse estos quemadores se detallará sobre los diferentes quemadores fabricados para gas pobre.

5.1 Equipos de Limpieza y Depuración de Gases

Como se mencionó en el capítulo anterior cuando el gas sale del gasificador se debe tener en cuenta la cantidad de tar y el tamaño de la partícula, para obtener un gas de mejor calidad se debe usar un sistema separador de partículas que sea sencillo, por eso a continuación se detallará sobre los ciclones.

5.1.1 Ciclones

Son los equipos depuradores de partículas más sencillos de alta eficiencia de los que se dispone y los de más bajo costo. La temperatura de trabajo solo está limitada por los materiales de construcción. Los ciclones son el único tipo relevante de separadores de partículas a alta temperatura (hasta 1 000°C).

Se trata de equipos depuradores sin partes internas móviles en las cuales se consigue que tanto el gas como las partículas contenidas en él cambien su velocidad de entrada generándose un movimiento circular.

Un separador ciclónico está compuesto básicamente por un cilindro vertical con fondo cónico, dotado de una entrada tangencial normalmente rectangular. La corriente del gas se encuentra cargada con las partículas sólidas las cuales se introducen tangencialmente en el recipiente cilíndrico a velocidades de aproximadamente entre 15m/s a 30m/s, saliendo el gas limpio a través de una abertura central situada en la parte superior.

Funcionamiento

Las partículas, por el efecto centrífugo tienden a moverse hacia las paredes del ciclón. al rozar con la pared, estas pierden velocidad cayendo por gravedad al fondo. El principio de trabajo de cualquier ciclón es el siguiente: el gas a limpiar describe una curva a gran velocidad y la fuerza centrífuga separa el polvo.

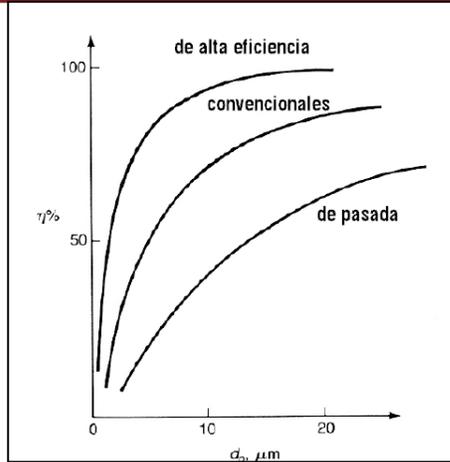
Campo de Utilización

Los separadores ciclónicos, se emplean para:

- Eliminar o reducir partículas sólidas de corrientes de aire cargadas de polvo.
- Si se quieren obtener altas eficiencias de limpieza, se tendrá en cuenta que:
- Los ciclones son adecuados para eliminar partículas de tamaño superiores a 10 μm .
- Los multiciclones son adecuados para eliminar partículas > 5 μm o para limpiezas grandes flujos o caudales de aire contaminado.

5.1.2 Ciclón convencional

Existen tres categorías de ciclones, los cuales se pueden clasificar dependiendo de su eficiencia de separación: de alta eficiencia, convencionales y de pasada. La gráfica 5.1 muestra las curvas generalizadas de eficiencia versus tamaño de particulado, para las distintas categorías de ciclones.



Grafica 5.1 Rendimiento de los diferentes tipos de ciclones [5.1]

Por razones de aplicación y costo se seleccionará un ciclón convencional, a continuación se hace un pequeño dimensionamiento de los ciclones convencionales (ver figura 5.1)

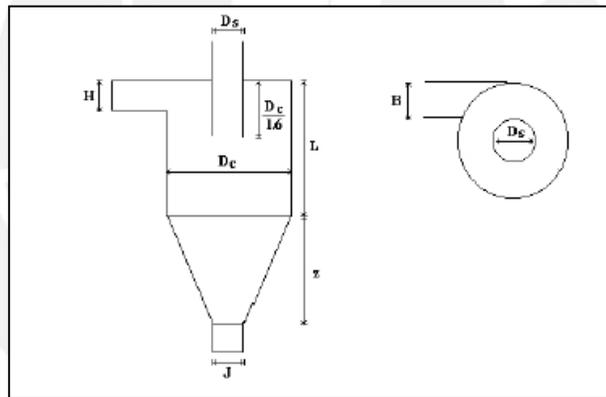


Figura 5.1 Ciclón convencional [5.2]

La figura anterior muestra los parámetros del ciclón, estos se muestran a continuación:

$$L=2DC$$

$$Z=2DC$$

$$D_s=DC/2$$

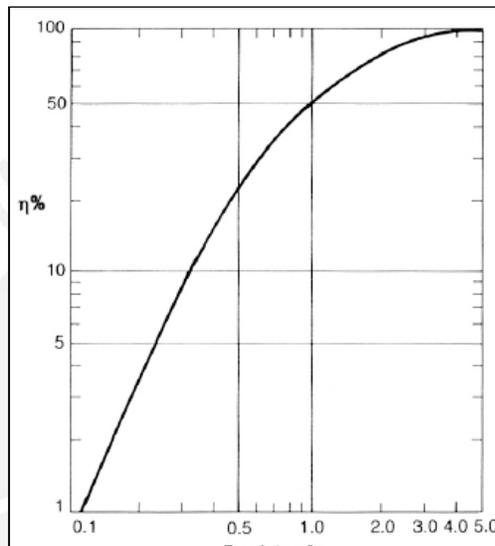
$$J=DC/4$$

$$B=DC/4$$

$$H=DC/2$$

Cuando el gas entra en un ciclón su velocidad sufre una distribución, de modo que la componente tangencial de velocidad aumenta con la disminución del radio.

En la gráfica 5.2 se muestra la eficiencia de recolección de particulado versus el cociente entre el diámetro real del particulado y el diámetro máximo de partícula para la cual la eficiencia de captaciones de un 50% (D/D').



Grafica 5.2 Diámetro de la partícula vs eficiencia [5.3]

La relación empírica de Rossin, Rammler e Intelmann , identifica el termino D' con la siguiente ecuación:

$$D' = \sqrt{\frac{9\mu B}{2\pi Nv(\rho_s - \rho)}} \dots\dots\dots (\text{ec. 5.1})$$

B = Largo del ducto de entrada al ciclón, en m²

N = Numero de vueltas dadas por el gas en el interior del ciclón (igual a 5)

v = Velocidad de entrada del gas al ciclón basada en un área B x H (se recomienda usar 15 [m/s])

μ = Viscosidad del gas, en kg/(m. s)

ρ_g = Densidad del gas, en kg/m³

ρ_s = Densidad de la cascarilla de arroz, en kg/m³

Se proyecta un ciclón que capte particulado con un tamaño de 25 μm y con una eficiencia del 100%. Con la figura anterior se puede calcular D´

- η=100%
- D/D´ = 5
- D´= 4 μm

Ahora se procede a calcular Dc suponiendo un número de vueltas dadas por el gas de 5 (N=5)

$$B = D_c / 4$$

Si la lo anterior se conjuga con la ecuación de Rossin, Rammler e Intelmann se obtiene que

$$D_c = 13,96 * \frac{v(\rho_s - \rho)D_r^2}{\mu} \dots\dots\dots (\text{ec. 5.2})$$

Suponiendo una velocidad de entrada para el gas, para un rango entre 15 y 30 [m/s], utilizando los parámetros del ciclón.

Tabla 5.1. Características del gas pobre

Parámetro	Unidades	Valor
Densidad de gases (ρ)	kg/m ³	0,33
Densidad de los sólidos (ρs)	kg/m ³	2 000
Viscosidad del gas (μ)	kg/(m. s)	500 x 10 ⁻⁷

Dimensiones del ciclón de eficiencia 100 % para partículas 30 μm son:

Tabla 5.2. Dimensiones del gasificador

Dimensión	Valor	Unidad
Dc	0,20	m
Lc	0,40	m
Zc	0,40	m
Ds	0,10	m

J	0,050	m
B	0,050	m
H	0,010	m

El ciclón que cumple con los parámetros se puede observar en el anexo 7., en caso de querer comprarlo; o en los planos (lamina 13 y14), en caso de querer fabricarlo.

5.2 Intercambiador de Calor

Una de las dificultades del gas pobre es la temperatura de salida del gas que alcanza 600°C, por esta razón se considera necesario el diseño de un intercambiador de calor, para reducir la temperatura a 200°C, este intercambiador de calor será del tipo haz de tubos y coraza, estos equipos son unos de los mas simples de diseñar y fabricar; el fluido a utilizar para el enfriamiento será agua, a continuación se muestra los datos y cálculos necesarios.

El primer paso es realizar el balance de energía para esto se tiene lo siguiente:

Datos del gas:

- Temperatura del Gas Entrada (T_1): 873 K
- Temperatura del Gas Salida (T_2): 473 K (Requerido)
- Diámetro de salida del gas: 3" (0,0762 m)
- Área: 0,004560 m²
- Velocidad del gas: 2,73 $\frac{m}{s}$
- Densidad del gas (600°C): 0,33 $\frac{kg}{m^3}$
- Flujo másico del gas : 0,004108435 $\frac{kg}{s}$
- Caudal: 0,0055 $\frac{m^3}{s}$

Se sabe que el calor transferido es:

$$Q = \dot{m}_g \times C_p \times \Delta T \dots \dots \dots (\text{ec.5.3})$$

Donde:

Q_i : Calor Transferido (kW)

\dot{m}_g : Flujo másico del gas ($\frac{kg}{s}$)

C_p : Calor específico del gas ($\frac{kJ}{kg \times K}$)

ΔT : Diferencia de Temperatura (K)

Para calcular el calor específico del gas se tiene que:

$$C_p = \sum_{i=1}^n x_i \times C_{pi} \dots \dots \dots \text{(ec. 5.4)}$$

C_p : calor específico de la mezcla, a presión constante.

x_i : fracción molar del componente i.

C_{pi} : calor específico del componente i, a presión constante.

n: número total de componentes en la mezcla.

Luego se halla el calor específico de cada elemento, además se tiene conocimiento del porcentaje de volumen del gas, este concuerda con el porcentaje molar.

Tabla 5.3 Composición del gas pobre

Producto	Molar (%)	Calor específico (kJ/kg-K)
CO	26,10	1,14
CO2	6,60	1,18
H2	20,60	1.46
H2O	8,60	2,13
CH4	0,00	0,00
N2	38,10	1,12

Luego se obtiene que el calor específico del gas es: $1,282 \frac{kJ}{kg \times K}$

Entonces ahora se obtiene el calor transferido:

$$Q = 1.17 \text{ kW}$$

El siguiente paso es hallar la temperatura de salida del agua, para esto se realiza los siguientes cálculos:

Datos del agua:

- Temperatura del Agua Entrada (t_1): 298 K (25 C°)
- Diámetro de salida del agua: 1/4" (9,22 mm, diámetro interno)
- Área: $6,67 \times 10^{-5} \text{ m}^2$
- Velocidad del agua: $0,5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$
- Densidad del agua (25°C): $990 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
- Flujo másico: $0,033 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$
- Calor Especifico del Agua: $4,183 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \times \text{K}}$

Como ya se tiene el calor transferido se obtiene la diferencia de temperatura (ΔT) del agua.

$$\Delta T: 8,46$$

Con este valor se tiene la temperatura de salida (t_2) del agua que sería: 306,46 K (33,46°C).

Al tener todas las temperaturas se prosigue a calcular la diferencia media de temperaturas (MTD), donde en un intercambiador de calor de casco y tubo es la diferencia media logarítmica de temperaturas (LMTD) multiplicado por un factor de corrección (F).

$$\text{MTD} = \text{LMTD} \times F \dots \dots \dots (\text{ec. 5.5})$$

$$\text{LMTD} = \frac{(T_1 - t_2) - (T_2 - t_1)}{\ln \frac{(T_1 - t_2)}{(T_2 - t_1)}}$$

$$\text{LMTD} = 369,71$$

Luego se selecciona un coeficiente global de intercambio de calor:

Tabla 5.4. Coeficientes Típicos de Intercambio de calor (U) [5.4]

COEFICIENTES TIPICOS GLOBALES DE INTERCAMBIO DE "U"		
Corriente Cálida	Corriente Fría	kcal/m ² -K-h
Agua	Agua	86 – 1 400
Gases	Agua	13 - 215
Aceites Livianos	Agua	300 - 770
Aceites Pesados	Agua	50 - 215

Para los cálculos del intercambiador de calor se asume una corriente cálida de gases y una corriente fría agua, donde el coeficiente global será 13 kcal/m²-K-h (0,0151 kJ/m²-K-s).

Como se tiene el Coeficiente Global de Transferencia de Calor (U), la diferencia media de temperaturas (MTD) y el calor transferido (Q), se puede hallar el Área de Transferencia de Calor (A_o) con la siguiente fórmula:

$$A_o = \frac{Q}{MTD \times U} \dots\dots\dots (ec. 5.6)$$

$$A_o = 0,21 \text{ m}^2$$

Asumiendo una velocidad lineal de 2,5 $\frac{m}{s}$ dentro de los tubos y un caudal de 0,0055 $\frac{m^3}{s}$ se obtiene el área transversal del flujo requerido total: 0,0055/2.5= 0,0022 m² (0,024 pie²), como este es una superficie relativamente pequeña será suficiente usar tubos de 5/8”.

El número de tubos se puede hallar con la tabla 5.5., donde se puede observar que para tubos de 5/8” se requiere por 1 pie² de área transversal de flujo 746 tubos, como se obtuvo un área de 0,024 pie², entonces se obtiene que el número de tubos es 746 x 0,024 = 18 tubos.

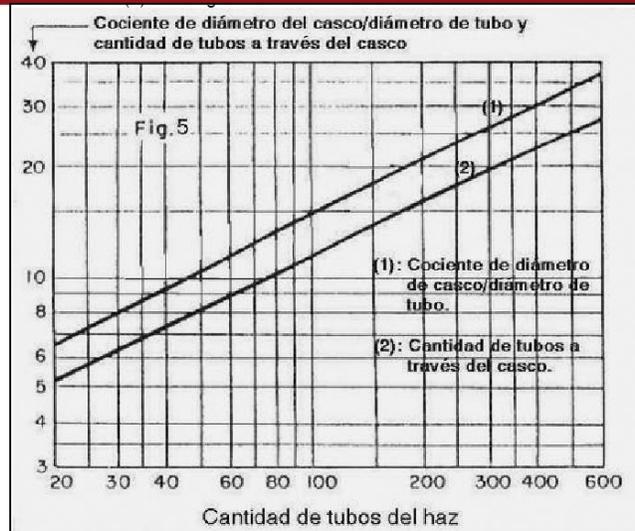
Tabla 5.5. Dimensión y Números de Tubos [5.5]

Área transversal de flujo y Superficie para Tubos		
Diámetro Externo (Pulgadas)	Número de tubos en 1 pie ² de Área transversal de flujo	Superficie por pie de longitud de haz contenido en 1 pie ² de Área transversal de flujo
1/2	1 340	175
5/8	746	122
3/4	476	94
7/8	330	76
1	242	63
1 1/8	185	55
1 ¼	146	48
1 ½	99	39

Luego se calcula la longitud de los tubos en la tabla 5.5 se puede observar que para tubo de 5/8" el área externa contenida en 1 pie² de área transversal de flujo por 1 pie de longitud es de 122. El área externa por pie de longitud es el producto del área externa contenido en 1 pie² por el área transversal de flujo requerido: 122 x 0,024. La longitud se obtiene dividiendo el área de intercambio por el área externa por pie de longitud:

$$L = \frac{2,261 \text{ pie}^2}{0,024 \times 122} = 0,78 \text{ pie} (0,24 \text{ m})$$

Por último se hallará el diámetro del casco, esto se calculará con la gráfica 5.3 como se puede observar en el eje X esta el número de tubos e interceptando con la curva 1 se encuentra un factor que es el cociente entre el diámetro del casco y el diámetro del tubo, para nuestro caso el factor es 6,5 y con un diámetro de tubo de 5/8" da un diámetro de casco de 4" (102 mm). En la figura 5.2 se puede observar un esquema del intercambiador de calor.



Gráfica. 5.3. Diámetro del Casco del Intercambiador de Calor [5.6]

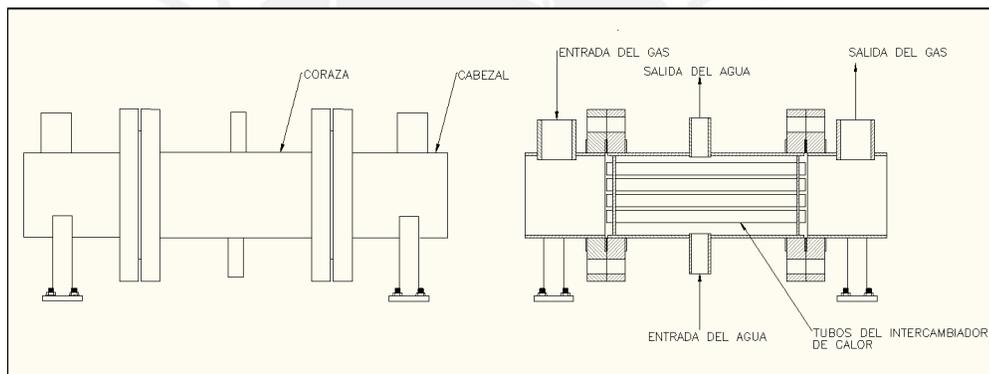


Figura. 5.2. Esquema del Intercambiador de calor

Con los valores hallados, se realizará la compra del intercambiador de calor.

5.3 Quemadores

Los quemadores son los equipos donde se realiza la combustión, por tanto deben contener los tres vértices del triángulo de combustión, es decir que deben lograr la mezcla íntima del combustible con el aire y además proporcionar la energía de activación.

Debe ser diseñado para asegurar una alimentación adecuada para la llama, el gas y el aire, tanto para alcanzar la potencia térmica especificado con baja producción de contaminantes (especialmente de CO y NOx), y distribuir la zona de reacción

(llama) y el movimiento de productos de combustión de forma que el calor se transfiera a la carga de manera eficiente.

Según sea el combustible utilizado, los quemadores se clasifican en quemadores de gas, de combustibles líquidos y de combustibles sólidos. En el caso de estos últimos, si la aportación del sólido es neumáticamente (carbón pulverizado, por ejemplo) existe cierta homogeneidad con respecto al equipo utilizado para los otros combustibles. A continuación se detallará más sobre los quemadores a gas, ya que será el empleado en el proceso de cocción.

5.3.1 Quemadores gas

La siguiente clasificación está en función del modo de alimentación del gas y del aire.

5.3.1.1 Quemadores de pre-mezcla

De este quemador se desprende tres tipos:

- a. Quemadores de pre-mezcla a presión
- b. Quemadores atmosféricos (gas a presión que induce aire)
- c. Quemadores oxi-gas

a. Quemadores de pre-mezcla a presión

Suelen ser de pre-mezcla total; los fenómenos a tener en cuenta son los de retorno y desprendimiento de llama.

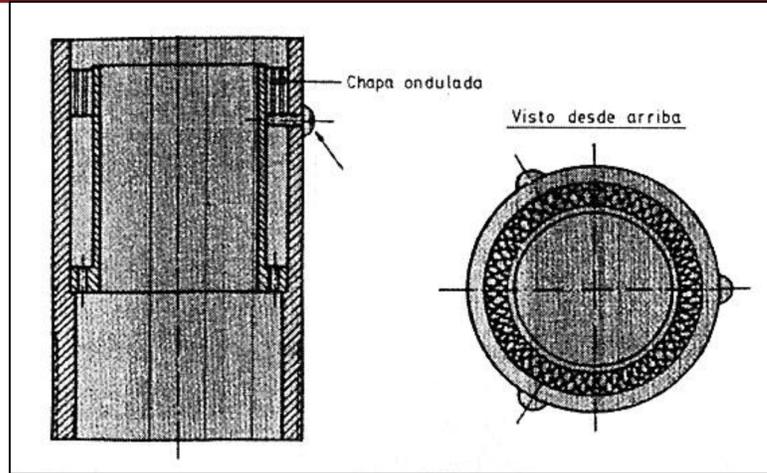


Figura 5.3 Corona estabilizadora de chapa ondulada, su finalidad consiste en generar una corona de pequeñas llama que rodean a la llama principal y la estabilizan [5.7]

- Fenómeno de retorno de llama

Una pared fría ejerce una acción inhibitoria de la combustión. Existe un diámetro límite que es el mínimo requerido para que se propague la combustión. Su valor depende de la naturaleza de la mezcla y de la temperatura de la pared.

También se define una distancia de seguridad, en la que se tiene en cuenta el calentamiento de las paredes por la llama. A bajos caudales puede producirse un retroceso de la llama hacia el mezclador, excepto si el orificio de salida tiene un diámetro inferior a la distancia de seguridad.

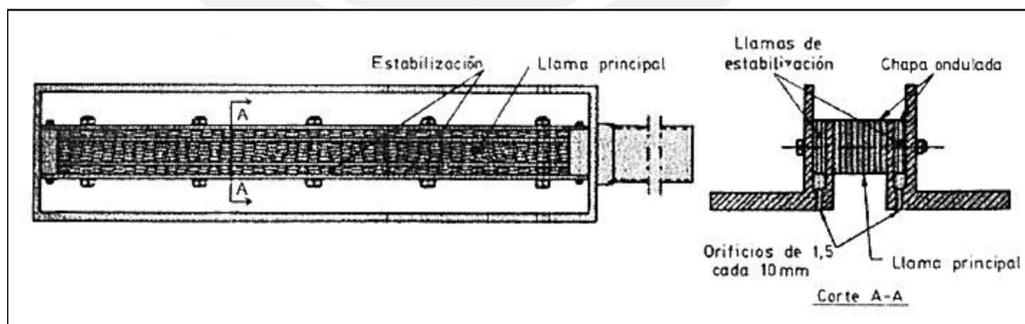


Figura 5.4 Quemador – rampa con estabilizadores. [5.8]

b. Quemadores atmosféricos

Una parte del aire necesario para la combustión (Aire Primario) se induce en el propio quemador por el chorro de gas salido de un inyector (efecto Venturi); el aire

restante (Aire Secundario) se obtiene por difusión del aire ambiente alrededor de la llama. No se requiere de un ventilador de aire ni órganos mecánicos que regulen el caudal del aire en función del caudal del gas.

La energía de activación se logra mediante llama piloto, que debe estar permanentemente encendida, o con encendidos automáticos (electrónicos, tren de chispas, etc). La regulación del gas se obtiene por variación de la presión en el inyector (abriendo y cerrando progresivamente la válvula de gas); esto permite que el quemador pueda ser modulante con relativa facilidad.

La regulación del aire (con gas a presión constante) (ver figura 5.5) se puede conseguir:

- Variando la sección de entrada de aire, por obturación de los orificios por donde entra, mediante discos roscados, anillo móvil o capuchón deslizante.
- Por deslizamiento de la boquilla del inyector respecto del venturi.

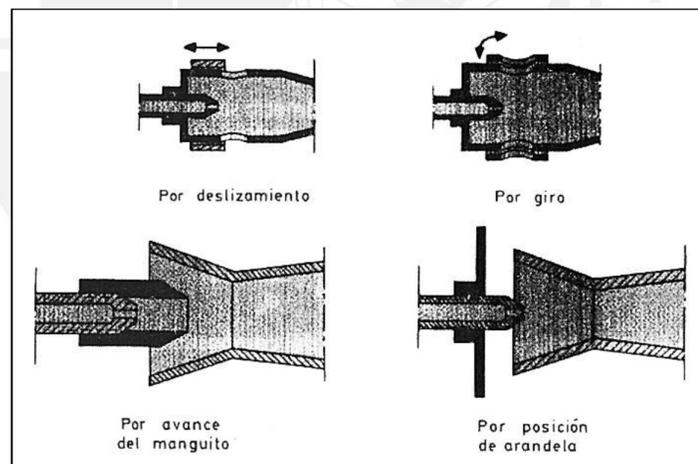


Figura 5.5 Tipo de regulación del aire en quemadores atmosféricos (deslizamiento, avance, giro y estrechamiento de sección, arandela roscada) [5.9]

Partes de los quemadores atmosféricos (ver figura 5.6 y 5.7)

- Inyector: Dispositivo para inyectar el combustible.
- Venturi: Cuando el gas y el aire primario se mezclan, buscando siempre una completa homogeneización de la mezcla.

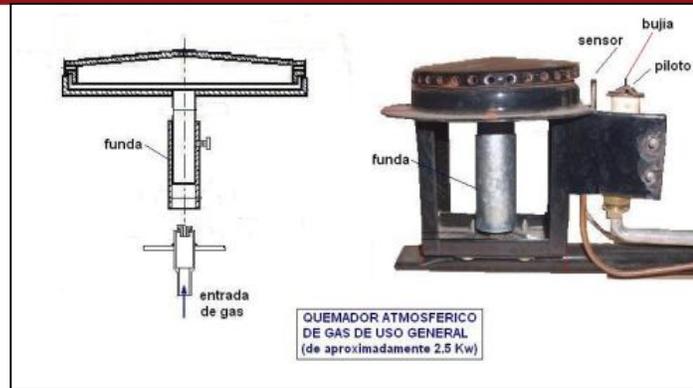


Figura 5.6 Partes de un quemador atmosférico [5.10]

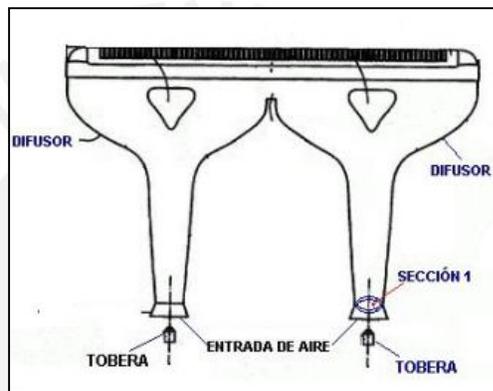


Figura 5.7 Partes de un quemador atmosférico [5.11]

Estos quemadores se usan, principalmente, en los aparatos domésticos de gas y tienen aplicaciones industriales limitadas, raramente sobrepasan potencias entre 50 y 200 kW.

c. Quemadores oxi-gas

Se requieren cuando se desean temperaturas elevadas de calor (sopletes). Como combustibles se usan C_2H_2 , C_3H_8 , C_3H_6 y gas natural, dándose en la siguiente tabla valores típicos:

Tabla 5.6 Parámetros típicos de sopletes gas-oxígeno para distintos tipos de combustibles [5.12]

Combustible	Temperatura Teórica llama °C	Potencia esp. Frente llama (kW/cm ²)	O ² teórico m ³ /kW-h (PCI)
Gas natural	2 740	3,8	0,201
Propano	2 820	5,4	0,191
Tetreno	2 895	5,6	0,188
Acetileno	3 300	23	0,159

Para elegir correctamente el quemador, se tiene el primer parámetro que el combustible obtenido es un gas que se utiliza para procesos de cocción, entonces se tiene tres tipos de quemadores: pre-mezcla, oxigás y atmosféricos, por descarte se sabe que no puede ser de pre-mezcla, ya que estos son usados comúnmente como quemadores para calderas, y el segundo tampoco, porque son usados para sopletes, por eso el quemador utilizado sería un atmosférico. Los quemadores atmosféricos usan normalmente como combustible el gas natural (gn) y el gas licuado de petróleo (glp).

Los catálogos sobre quemadores atmosféricos se tiene que los parámetros para seleccionar este tipo de quemador son la capacidad y la presión (observar anexo 8), como se ve a continuación:

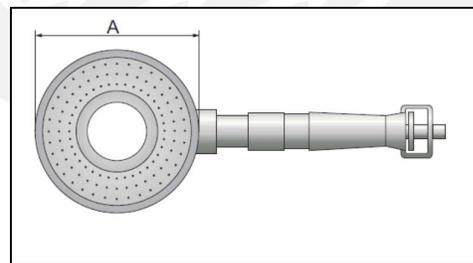


Figura 5.8 Quemador atmosférico

Tabla 5.7 Características del quemador de Gas natural

Capacidad (kcal/h)	Diámetro A (mm)	Presión de trabajo (bar)
12 000	180	0,020
21 000	210	0,020
28 000	240	0,020
45 000	330	0,020

Tabla 5.8 Características del Quemador de GLP

Capacidad (kcal/h)	Diámetro A (mm)	Presión de trabajo (bar)
12 000	180	0,028
20 000	210	0,028
30 000	240	0,028
45 000	330	0,028

Como la potencia de la cocina es de 25 kW (21 495 kcal/h) y como se usa tres quemadores, cada uno tendrá la capacidad de 7 165 kcal/h, con este valor se tiene un diámetro de quemador de 180 mm.

A continuación se hace un análisis de cada combustible (gn, glp y gas pobre), ya que quizás existe problemas al utilizar este tipo de quemador para gas licuado de petróleo y gas natural con el gas obtenido (gas pobre).

5.4 Comparación de combustibles (GN, GLP Y Gas pobre)

A continuación se detallará sobre los combustibles utilizados en los quemadores como el gas licuado de petróleo y el gas natural, y se comparara con el gas pobre.

5.4.1 Gas licuado de petróleo

Los gases licuados del petróleo (G.L.P.) reciben este nombre debido a que son un subproducto de la destilación del petróleo. Entre los subproductos obtenidos están el Butano y el Propano. También reciben el nombre de licuados debido a que para su almacenamiento y transporte es mejor hacerlo en estado líquido, ya que ocupan menos volumen dentro de los depósitos.

El GLP se compone mayormente por Butano y el Propano, son compuestos de hidrógeno y carbono por eso reciben el nombre de hidrocarburos. Responden a la fórmula general de los hidrocarburos, que es C_nH_{2n+2} .

La composición molar típica de un propano comercial es la mostrada en la siguiente tabla 5.9:

Tabla 5.9 Composición molar del propano comercial [5.13]

Componente	%Volumen
Etano (C ₂ H ₆)	0,63%
Propano (C ₃ H ₈)	87,48%
Isobutano (iC ₄ H ₁₀)	6,30%
Butano normal (nC ₄ H ₁₀)	5,59%

Otro aspecto importante es la densidad y la viscosidad de propano comercial, a una temperatura de 30 °C, esto se puede observar en la tabla 5.10.

Tabla 5.10 Propiedades físicas del propano [5.14]

Viscosidad x 10 ⁷ (kg x m ⁻¹ x s ⁻¹)	Densidad (kg/m ³)
86,6	1,52

5.4.2 Gas natural

El gas natural es un combustible compuesto por un conjunto de hidrocarburos livianos, el principal componente es el metano (CH₄), como se puede observar en la tabla 5.11 y en la tabla 5.12 se puede observar la viscosidad y densidad a 30 °C.

Tabla 5.11 Composición molar del gas natural

Componente	Nomenclatura	Composición (%)
Metano	CH ₄	95,08
Etano	C ₂ H ₆	2,14
Propano	C ₃ H ₈	0,29
Butano	C ₄ H ₁₀	0,11
Pentano	C ₅ H ₁₂	0,04
Hexano	C ₆ H ₁₄	0,01
Nitrógeno	N ₂	1,94
Dióxido de carbono	CO ₂	0,39

Fuente: OSINERG

Tabla 5.12 Propiedades físicas del gas natural

Viscosidad x 10 ⁷ (kg x m ⁻¹ x s ⁻¹)	Densidad (kg/m ³)
0,105	0,7

Fuente: OSINERG

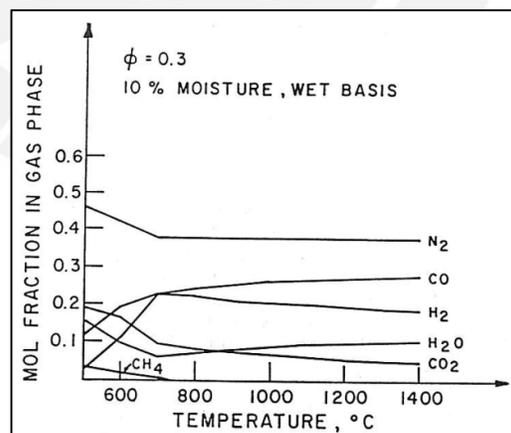
5.4.3 Composición del gas pobre (Cascarilla de arroz)

Es simple cálculo para determinar la cantidad de aire necesaria para quemar tres productos: Nitrógeno (N_2), agua (H_2O) y dióxido de carbono (CO_2). Si es posible controlar el proceso de tal manera que esos son los únicos tres componentes, este proceso se conoce como la combustión estequiométrica o de la combustión con el 100% de aire teórico.

Las dificultades surgen cuando no se imponen restricciones sobre los productos y al menos de 100% de aire teórico. Se puede demostrar un proceso de combustión que tiene lugar a menos que el aire estequiométrico, este proceso será descrito con la relación equivalente (Φ) que se define como:

$$\Phi = \frac{\text{Masa de aire para la reaccion de combustion}}{\text{masa de aire estequiometrica para la reaccion}}$$

Para el dimensionamiento del gasificador se recomienda usar una relación equivalente de 0,3, a continuación se mostrará la gráfica 5.4 donde se podrá observar como varía la composición del gas con el aumento de la temperatura, a una humedad del 10% del combustible.



Grafica 5.4 Composición del gas vs Temperatura [5.15]

A continuación se muestra una tabla donde se observará el % de volumen del gas para una temperatura de 1 000 °C, $\Phi = 0,3$ y una humedad del 10%, esto da la siguiente composición.

Tabla 5.13 Composición del gas pobre a 1000 °C [5.16]

Producto	% volumen
CO	26,10
CO ₂	6,60
H ₂	20,60
H ₂ O	8,60
CH ₄	0,00
N ₂	38,10

En la tabla 5.14 se observa las propiedades físicas del gas a una temperatura de 100 °C.

Tabla 5.14 Propiedades físicas del gas pobre [5.17]

Viscosidad x 10 ⁷ (kg x m ⁻¹ x s ⁻¹)	Densidad (kg/m ³)
160	0,33

Al tener todos estos datos se puede llegar a la conclusión que no existe problemas en el uso de un quemador atmosférico para gas natural y GLP, el único inconveniente es el tamaño de los agujeros del quemador, ya que como se vio en el capítulo 4 existe un riesgo en que hay un atascamiento y el gas no pueda fluir.

Existe dos posibilidades, uno es usar el quemador atmosférico para gas natural o glp, y el otro es hacer un diseño del quemador basándose en el principio de funcionamiento del quemador atmosférico, a continuación se detallará sobre este tipo.

5.5 Quemador para el gas pobre

Este quemador consiste en un cilindro con varios agujeros por los costados, y con agujeros en la parte superior, el primero sirve para que ingrese el aire secundario y así haya un mejor rendimiento en el quemado, y el segundo es donde sale el gas mezclado con el aire secundario, el flujo del gas es controlado por una válvula bola que se encuentra en la parte inferior del quemador (ver figura 5.13), el diámetro del cilindro sería el mismo que se selecciona para un quemador de GLP o gas natural.



Agujeros

Figura 5.9 Modelo del quemador [5.18]



Válvula

Figura 5.10 Modelo de quemador [5.19]

5.5.1. Diámetro de los agujeros del quemador

Calcular el diámetro de agujeros necesarios para el quemador, esto es importante para quemar correctamente los gases. La velocidad del gas en el agujero debe ser entre 0,5 m/s a 1 m/s, este rango es suficiente para crear la combustión. La velocidad de la llama debe tocar la olla esto es importante cuando se considera la transferencia de calor. Cuanto mayor sea la velocidad, más eficaz es la transferencia de calor. Se recomienda un mínimo de 80 agujeros en el quemador. Para calcular el diámetro de los agujeros del quemador se puede utilizar la siguiente ecuación:

$$D_q = \left(\frac{1,27 * Q_a}{N * V_g} \right)^{0,5} \dots\dots\dots (ec.5.7)$$

D_q : Diámetro de los agujeros del quemador (mm)

Q_a : Flujo de aire (m^3/h)

N : Número de agujeros (se recomienda 80 agujeros) [5.20]

V_g : Velocidad del gas (entre 0,5 m/s a 1 m/s) [5.21]

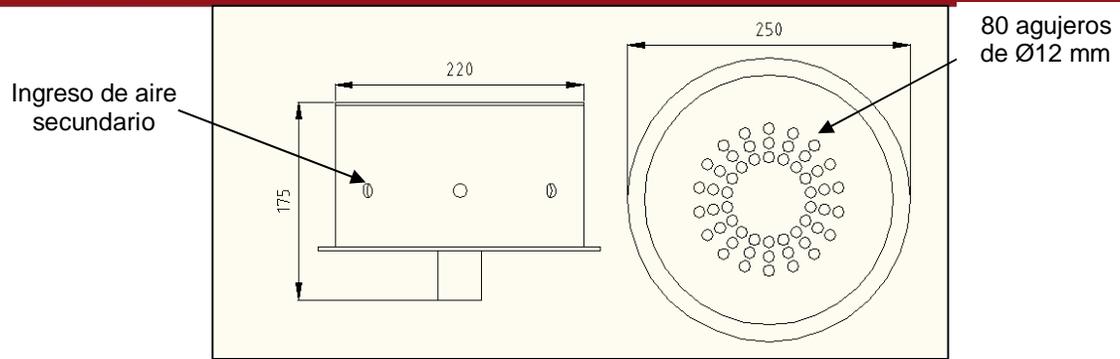


Figura 5.11. Esquema del quemador

Para un caudal de gas de $16,87 \text{ m}^3/\text{h}$ se tiene un diámetro de agujero de 12 mm, tener en cuenta que lo realizado anteriormente es un esquema y esto sirva como inicio para su construcción o mejor diseño en futuros proyectos similares.

En caso de que no sea conveniente diseñar este quemador, se puede usar un quemador de gas licuado de petróleo o gas natural.

Referencias Bibliográficas del capítulo 5

- [5.1] REED, Thomas B.
2007 *Handbook of biomass downdraft gasifier engine systems.*
- [5.2] *Ibíd.*
- [5.3] *Ibíd.*
- [5.4] Rodríguez Jorge
Introducción a la Termodinámica. Consulta: 8 de agosto 2012
<<http://www.radiadoresgallardo.cl/topintercambiaodres.pdf>>
- [5.5] *Ibíd.*
- [5.6] *Ibíd.*
- [5.7] MARQUEZ, Manuel
2005 *Combustión y quemadores*, Primera edición. España:
Marcombo
- [5.8] *Ibíd.*
- [5.9] *Ibíd.*
- [5.10] *Ibíd.*
- [5.11] *Ibíd.*
- [5.12] *Ibíd.*
- [5.13] SAMILLAN, Richard
Características de los G.L.P. Consulta: 10 de septiembre del
2012
<[http://www.unprg.edu.pe/bounprg/blogs/media/blogs/rsamillan
i/DMecanico/simbologia.pdf](http://www.unprg.edu.pe/bounprg/blogs/media/blogs/rsamillan/i/DMecanico/simbologia.pdf)>
- [5.14] *Ibíd.*
- [5.15] KAUPP, Albrecht
1984 *Gasification of rice hulls: theory and practice.* Primera edición.
Braunschweig ; Wiesbade: Vieweg
- [5.16] *Ibíd.*
- [5.17] *Ibíd.*

- [5.18] BELONIO Alexis , Rustamadji, y BimaTahar
2009 *Two burners rice husk gas stove for domestic or institutional cooking operation, Tangerang*. Consulta: 2 de Agosto del 2012
<http://www.bioenergylists.org/stovesdoc/approtech/Two_Burner_Rice_Husk_Gas_Stove1.pdf >
- [5.19] Ibíd.
- [5.20] BELONIO Alexis T.
2005 *Rice husk gas stove handbook*. Iloilo Consulta: 2 de junio del 2011
<http://www.bioenergylists.org/stovesdoc/Belonio/Belonio_gasifier.pdf>
- [5.21] Ibíd.



CAPITULO 6 COSTO DEL SISTEMA

Este capítulo trata sobre el costo del sistema, esto incluye el gasificador, intercambiador de calor y el ciclón, además de todos los accesorios involucrados, tales como tuberías, codos y bridas. Se realizará un listado de todos los suministros necesarios para la fabricación del sistema, y además el tiempo de fabricación y montaje del sistema.

6.1. Costo de Suministro

Para realizar el listado de los suministros se realiza un pequeño metrado del sistema, donde se diferenciará los suministros necesarios para el gasificador, intercambiador de calor y ciclón, además de los accesorios del sistema.

En el Tabla 6.1, 6.2, 6.3 y 6.4 se puede observar el listado de suministro para el gasificador, intercambiador de calor, ciclón y para todo el sistema con sus respectivos costos.

Tabla 6.1. Costo de suministro del gasificador

GASIFICADOR				
Materiales	Unidad	Cantidad	Costo Unitario	Costo Total (US\$)
Varilla A615 – 9.5 mm	m	3,50	0,50	1,76
Tubo 1/2" A53 Sch. 80	m	0,30	2,52	0,76
Manta de Fibra Cerámica 1" x 7 metros	un.	1,00	167,91	167,91
Plancha Estructural 6 m x 1.5 m x 3 mm	un.	1,00	156,84	156,84
Plancha Estructural 1.5 m x 1.5 x 12mm	un.	1,00	170,00	170,00
Espárragos M6X100 / Incluye Tuercas y arandelas	un.	16,00	0,40	6,40
Esparrago M16x50 / Incluye Tuercas y arandelas	un.	3,00	0,80	2,40
Esparrago M16x330 / Incluye Tuercas y arandelas	un.	1,00	3,86	3,86
Ventilador	un.	1,00	10,00	10,00
Empaquetadura	un.	1,00	25,00	25,00
			Total	\$/ 544,93

Tabla 6.2. Costo de Suministro del Gasificador

INTERCAMBIADOR DE CALOR				
Materiales	Unidad	Cantidad	Costo Unitario	Costo Total (US\$)
Tubo 4" ASTM A53 Sch. Std.	m	0,80	16,37	13,10
Tubos de 5/8" ASTM A179 Sch. Std.	m	4,00	3,50	14,00
Platina 1/4"x 3/4" ASTM A36	m	0,75	2,00	1,50
Brida Slip On 3 1/2" Clase 150	un.	4,00	15,00	60,00
Niple 1 1/2" x 2" ASTM A53	un.	2,00	0,70	1,40
Niple 1/4" x 2" ASTM A53	un.	2,00	0,30	0,60
Espárragos M16X90, incluye tuercas y arandelas	un.	16,00	1,00	16,00
Espárragos M6X100 / Incluye tuercas y arandelas	un.	16,00	0,40	6,40
Total			\$ 138,00	

Tabla 6.3. Costo de Suministro del Ciclón

CICLÓN				
Accesorios	Unidad	Cantidad	Costo Unitario	Costo Total (US\$)
Plancha Estructuras 6mx1.5x3mm	un.	1,00	156,84	156,84
Espárragos M6X100 / Incluye Tuercas y arandelas	un.	16,00	0,40	6,40
Ángulo 20mm x 20mm x 2mm	m	1,60	4,75	7,60
Tubo 2" A53 Sch. Std.	m	0,20	78,42	15,68
Tubo 4" A53 Sch. Std.	m	0,16	18,33	2,93
Tubo 8" A53 Sch. Std.	m	0,40	46,20	18,48
Jebe Natural	un.	1,00	20,00	20,00
Angulo Estructural L20X20X2 mm A 36	m	2,00	8,00	16,00
Total			\$ 243,94	

En el Tabla 6.4 se puede observar el listado de accesorios para el sistema (unión entre el gasificador, intercambiador de calor y el ciclón), con sus respectivos costos.

Tabla 6.4. Costo de Suministro del Sistema

SISTEMA				
Accesorios	Unidad	Cantidad	Costos Unitario	Costo Total (US\$)
Bridas Slip On 1 1/2" 150 lbs.	un.	2,00	3,47	6,94
Tubo 1 1/2" A53 Sch. Std.	m	0,30	3,61	1,08
Niple 1 1/2" x 18" Sch. Std.	un.	1,00	3,00	3,00
Niple 2" x 3" Sch. Std.	un.	1,00	1,00	1,00
Conector 1 1/2"	un.	2,00	2,50	5,00
Codo 1 1/2" - 2" 90° x 1500 lbs A234	un.	1,00	2,50	2,50
Codo 1 1/2" 90° x 1500 lbs A234	un.	2,00	1,56	3,12
			Total	\$ 22,64

6.2. Costo de Fabricación e instalación

Para cuantificar el costo de fabricación y montaje del equipo el primer paso es mandar a cotizar a empresas dedicadas al rubro de fabricación, pero se debe tener en cuenta que la dificultad de fabricar este equipo es mínima, por eso se buscará talleres pequeños, donde mayormente realizan trabajos simples, sin embargo; existe la posibilidad de que los costos y el tiempo de la fabricación sean excesivos, para saber realmente el monto y el tiempo del presupuesto primero se debe saber qué tipo de manufactura se realizará con cada suministro, como por ejemplo la plancha estructural A-36 de 3 mm de espesor se realizará el trabajo de corte para mandarlo a rolar (este trabajo mayormente se sub-contrata), al tener la plancha en forma de tubo (rolado) se realizará los respectivos cortes para el acceso (puerta) y para la base, al tener todos los trabajos se coloca los respectivos ratios (rendimientos) que mayormente son el esfuerzo de un hombre (horas) para realizar el trabajo, estos rendimientos son sacados de libros de empresas constructoras o instituciones que se han especializado en analizar estos números, para este proyecto se ha tomado el libro: "*Piping ManHour Manual*" y también los usados en empresas de construcción, hay que tener en cuenta que el estudio realizado fue en Estados Unidos, por esta razón se coloca un factor que mayormente es de 1,55, en las Tablas 6.5, 6.6, 6.7 y 6.8 se podrán ver las horas totales del proyecto.

Tabla 6.5 Horas Hombres totales del gasificador

Descripción	Unidad	Cantidad	HH Unit.	HH total	HH Total (Incluido Factor)
Gasificador					
Varilla ASTM 615 - 6 mm	metros	0,25	2,00	0,50	0,78
Tubo 1/2" A53 Sch. 80 Std.	un.	2,00	0,50	1,00	1,55
Manta de Fibra Cerámica 1" x 7 metros	un.	1,00	20,00	20,00	31,00
Planchas Estructural A-36 – 1.5x6.0x3mm	un.	1,00	40,00	40,00	62,00
Plancha Estructuras A-36 1.5mx1.5mx12mm	un.	1,00	40,00	40,00	62,00
Ventilador	un.	1,00	3,50	3,50	5,43
Espárragos M6X10', incluye Tuercas y arandelas	un.	16,00	0,50	8,00	12,40
Esparrago M16x50, incluye Tuercas y arandelas	un.	3,00	1,00	3,00	4,65
Esparrago M16x330, incluye Tuercas y arandelas	un.	1,00	2,00	2,00	3,10
Sello mecánico	un.	1,00	2,50	2,50	3,88
				Total	186,78

Tabla 6.6 Horas Hombres totales del Intercambiador de calor

Descripción	Unidad	Cantidad	HH Unit.	HH total	HH Total (Incluido Factor)
Intercambiador de calor					
Tubo 4" A53 Sch. Std.	m	0,80	4,24	3,39	5,26
Tubos de calderería 5/8"	m	4,00	2,81	11,24	17,42
Brida Slip On 3 1/2" Clase 150	un.	4,00	5,10	20,40	31,62
Niple 1 1/2" x 2 "	un.	2,00	1,50	3,00	4,65
Niple 3/4" x 2 "	un.	2,00	0,75	1,50	2,33
Espárragos M16X90, incluye Tuerca Arandelas	un.	16,00	0,20	3,20	4,96
Espárragos M6X100, incluye Tuercas y arandelas	un.	16,00	0,20	3,20	4,96
Empaquetadura de Asbesto 1/8"	un.	2,00	0,50	1,00	1,55
				Total	72,74

Tabla 6.7 Horas Hombres totales del Ciclón

Descripción	Unidad	Cantidad	HH Unit.	HH total	HH Total (Incluido Factor)
Ciclón					
Planchas Estructural A-36 - 3mm	un.	1,00	40,00	40,00	62,00
Espárragos M6X100 / Incluye Tuercas y arandelas	un.	16,00	0,20	3,20	4,96
Ángulos 20x20x2	m	1,60	2,50	4,00	6,20
Tubo 2" A53 Sch. Std.	m	2,00	2,50	5,00	7,75
Tubo 4" A53 Sch. Std.	m	0,40	4,24	1,70	2,63
Tubo 8" A53 Sch. Std.	m	1,00	6,50	6,50	10,08
Jebe Natural	un.	1,00	2,50	2,50	3,88
				Total	97,49

Tabla 6.8 Horas Hombres totales del Sistema

Descripción	Unidad	Cantidad	HH Unit.	HH total	HH Total (Incluido Factor)
Intercambiador de calor					
Bridas Slip On 1 1/2" 150 lbs.	un.	2,00	1,50	3,00	4,65
Tubo 1 1/2" A53 Sch. Std.	m	0,30	1,80	0,54	0,84
Niple 1 1/2" x 18" Sch. Std.	un.	1,00	0,69	0,69	1,07
Niple 2" x 3" Sch. Std.	un.	1,00	0,11	0,11	0,17
Conector 1 1/2"	un.	2,00	2,00	4,00	6,20
Codo 1 1/2" - 2" 90° x 1500 lbs A234	un.	1,00	2,00	2,00	3,10
Codo 1 1/2" 90° x 1500 lbs A234	un.	2,00	2,00	4,00	6,20
				Total	22,23

El total de horas hombres usados para este proyecto es de 379,24 , para este tipo de trabajo se utiliza cuatro personas (soldador, tubero y dos ayudantes), los cuales trabajan 8 horas diarias , ósea 32 horas por día en total , entonces se tiene 12 días aproximadamente de trabajo, con esto tienes el tiempo aproximado del proyecto.

El siguiente paso es sacar el costo de la mano de obra, equipos y consumibles, este último se halla de un porcentaje del costo de la mano de obra (10% de la mano de obra), para las partidas a fabricar se van a utilizar los mismos recursos de

personal (soldador, tubero y dos ayudantes), en el tabla 6.9 se tiene la cantidad de horas hombres de cada uno con su respectivo costo.

Tabla 6.9. Costo total de la mano de obra

Descripción	HH total	Tarifa (US\$)	Costo (US\$)
Soldador	94,81	6,00	568,85
Tubero	94,81	3,50	331,83
Ayudante	18,62	3,00	568,85
		Total	1 469,54

Para calcular el costo de los equipos a utilizar, se tiene que tener un conocimiento sobre los que se utilizarán, para realizar los cortes se necesitará un equipo de corte junto con una maquina esmiladora, para los equipos a fabricar más pesados es necesario el uso de un tecele de 3 t para realizar cualquier maniobra sea para la fabricación o instalación, para la soldadura se utilizará una maquina de soldar de 400 amp, también se tiene un torquímetro para la instalación de los pernos. se debe tener en cuenta que dependiendo de los talleres los equipos pueden variar, los mencionados son los típicos usados en talleres. A continuación en la tabla 6.10 se puede ver los costos mensual de estos equipos mencionados,

Tabla 6.10 Costo mensual de los equipos

Descripción	Cantidad	Costo Mensual (US\$)	Factor de Uso	Costo (US\$)
Maquina de Soldar 400 A	1,00	350,00	0,30	105,00
Equipo de Corte X-31	2,00	75,90	1,00	151,80
Esmeril Eléctrico	2,00	57,90	1,00	115,80
Torquímetro	1,00	137,40	1,00	137,40
Tecele 3 t	1,00	41,10	1,00	41,10
		Total		551,10

El factor de uso se refiere a que no se puede considerar el costo total mensual del equipo si este no va ser usado todo el mes o el tiempo completo, para los equipos utilizados para soldar es necesario poner el factor de 0,3, ya que para 9 días para un total de 30 días es aproximadamente 30% de utilización, los demás equipos los cuales son usados con mayor frecuencia se coloca uno.

Para culminar el cálculo del costo del total para la fabricación e instalación del sistema, faltaría los costos de los sub-contratos, estos serían el rolado de las planchas para el gasificador y el ciclón, y además el transporte del gasificador, intercambiador de calor, ciclón y accesorios, estos costos se puede observar en la tabla 6.11 y 6.12.

Tabla. 6.11 Costo de los trabajos de Rolado

Descripción	Trabajo de Rolado (US\$)
Plancha estructural para gasificador Diámetro: 0.35 metros, Altura:1.5 metros , Espesor: 3 mm	186,57
Plancha estructural para ciclón Diámetro: 0.20 metros, Altura 0.35 metros , Espesor: 3 mm	120,00
Total	306,57

Tabla 6.12 Costo Transporte

Descripción	Transporte Taller- Transporte (US\$)	Transporte Lima - Trujillo (US\$)	Costo (US\$)
Gasificador	38,95	32,84	71,78
Intercambiador de Calor	15,58	13,13	28,71
Ciclón	19,47	16,42	35,89
Accesorios	6,00	5,06	11,06
	Total		147,45

Tabla 6.13 Costo total de los sub-contratos.

Descripción	Costo (US\$)
Gasificador	258,35
Intercambiador de Calor	28,71
Ciclón	155,89
Accesorios	11,06
Total	454,01

El costo de transporte se realizó en dos tramos, el primero fue desde el taller hasta la empresa de transporte, y el segundo fue desde la empresa de transporte hasta el destino final, para este ejemplo se uso la ciudad de Trujillo.

En la tabla 6.14 se puede observar una aproximación del costo total que saldría al manda a cotizar, teniendo en cuenta del alcance que se le da a la empresa a cotizar

,es decir si ellos dan los suministros y realizarán los sub-contratos , o el cliente dará todo lo anterior para solo costear la fabricación e instalación.

Tabla 6.14 Costo total del proyecto.

Descripción	Mano de Obra (US\$)	Suministros (US\$)	Equipos (US\$)	Consumibles (US\$)	Sub-Contrato (US\$)	Costo (US\$)
Gasificador	723,75	544,93	271,42	72,38	258,35	1 870,82
Intercambiador de Calor	281,89	138,00	105,71	28,19	28,71	582,50
Ciclón	377,77	236,64	141,67	37,77	155,89	949,74
Accesorios	86,13	22,64	32,30	8,61	11,06	160,74
					Total	3 563,81

A este costo total se le debe agregar la utilidad , que varía entre el 10% al 15%, para este análisis se tomara el 15%, y el I.G.V (18%) al final el costo total nos da \$/. 4 836,09, este costo final se le debe comparar con el cotizado (Observar Anexo 9), este punto se debe tomar como referencia, si el costo dado es muy elevado quizás se esté sobrevaluando, y si es muy debajo se debe pedir un mayor detalle de las consideraciones tomadas.

6.3. Rentabilidad del Proyecto

Lo importante de todo proyecto es que sea rentable, entonces el uso de un gasificador en los procesos de cocción es recomendable o no, para esto se hizo un análisis de un restauran o comedor a continuación en la tabla 6.15 y 6.16 se puede observar la venta y gastos mensual respectivamente.

Tabla 6.15 Venta Total

Descripción	Costo (S/.)
Plato Menú	5,00
Días Mensual	26
Platos diarios	120
Venta	S/.15 600,00

Tabla 6.16 Gasto Total

Descripción de los gastos	Costo (S/.)
Gastos de Limpieza	1 000
Gastos de Comida	30% de la venta total
Gastos de Transporte de combustible	200,00
Número de Trabajadores	4
Sueldo por trabajador	750
Gasto Total	S/. 8 130,00

Ahora vamos a analizar el proyecto para los próximos 12 meses, donde vamos ponernos como Tasa mínima atractiva de retorno (TMAR) el 10%, y ahora se utilizará el método de VPN (valor presente neto) y TIR (Tasa interna de retorno), aunque solo es suficiente utilizar un solo método, ya que las decisión de tomada bajo cualquiera de los dos criterios son absolutamente congruentes. El gasto inicial mostrado en la tabla 6.17 se refiere a los gastos de fabricación del gasificador más gastos de ollas, mesas, sillas y otros.

Tabla 6.17 Proyección de un año del proyecto

Mes	Utilidad
0	-20 000,00
1	7 470,00
2	7 470,00
3	7 470,00
4	7 470,00
5	7 470,00
6	7 470,00
7	7 470,00
8	7 470,00
9	7 470,00
10	7 470,00
11	7 470,00
12	7 470,00

Con la tabla 6.17 se puede hallar que el TIR es 36,45% (mayor a la TMAR), y el VPN es de S/.30 898,28; cualquier método utilizado nos puede indicar que el proyecto es factible.

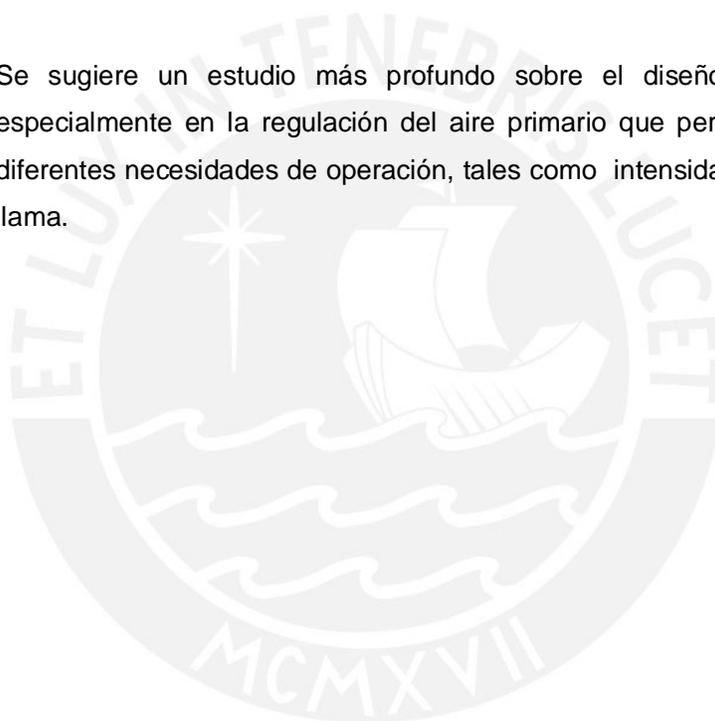
CONCLUSIONES

- La cascarilla de arroz reúne las características necesarias para su utilización en la producción de energía mediante el proceso de gasificación, debido al bajo porcentaje de nitrógeno (<0,6%), cloro (<0,1%) y azufre (<0,2%), y altos contenidos en materia volátil; además en el año 2012 se generó 599 800 TM de cascarilla de arroz, esto equivale aproximadamente 189 400 TEP (tonelada equivalente de petróleo) de energía que está disponible, también el costo del combustible es casi nulo.
- El gasificador tipo Downdraft fue seleccionado por ser adecuado para la aplicación en los procesos de cocción (mayores a 50 raciones), eso se debe a la potencia que se necesita, tipo de combustible a utilizar y la aplicación.
- Las características del gasificador son las siguientes: 25 kW de potencia, una eficiencia del 60%, temperatura máxima dentro del reactor de 700°C y temperatura externa de 48°C., altura de 1,40 m, diámetro de 0,30 m y 0,105 m³ de capacidad de almacenamiento de la cascarilla de arroz, además utiliza 11,60 kg de cascarilla de arroz por batch; por las dimensiones el gasificador no ocupa demasiado espacio en el área de trabajo. Para la generación del gas es necesario una relación de aire – combustible de 1,8, para esto es necesario el uso de un ventilador de las siguientes características: 10 Watts y que genere un caudal de aire de 33 CFM (56,1 m³/h).
- El gas generado contiene una cantidad moderada de tar y polvo, el motivo se debe al combustible utilizado, para disminuir la cantidad de tar es necesario el uso de un sistema de enfriamiento, y para reducir la cantidad de polvo es necesario un sistema de captación de polvo.
- Se sugiere comprar un intercambiador de calor de tipo coraza y tubos que tenga los siguientes parámetros: reducción de la temperatura del gas desde 600°C a 200°C, utilizar como agente refrigerante el agua con un flujo de 0.033 l/s, un calor disipado de 1.17 kW.

- Para utilizar la cascarilla de arroz como combustible para sistemas de cocción a gran escala es necesario un ciclón para la limpieza del contenido de partículas que contiene el gas, las características del ciclón son: de 0,85 m de altura y 0,20 m de diámetro y tendrá una eficiencia del 100% para partículas de 25 μm .
- Los quemadores comerciales de Gas Licuado de Petróleo o Gas Natural usados en el Perú no deberían tener dificultades cuando operen con el gas generado, pero al no tener algún equipo de similares características (potencia, tipo de combustible utilizado), podría haber dificultades de obstrucción, por tal razón se sugiere fabricar un quemador simple y sencillo, que evite estas dificultades.
- Para la fabricación del equipo sólo se necesita de un taller con trabajo en chapa (dobladora, rolado, etc.), y el costo del sistema es de aproximadamente S/.12 570. De este monto, el porcentaje que representa el equipo generador de gas es del 52%, el intercambiador del 16% y el ciclón del 27%, los accesorios representan el 5%. El costo es de materiales, equipos, mano de obra y costo de ingeniería.

RECOMENDACIONES

- La instalación correcta de la manta cerámica dentro de la unidad generadora de gas es esencial, debido a que con él se evita una pérdida significativa de calor.
- En aplicaciones donde la unidad generadora de gas debe operar por periodos prolongados de tiempo se recomienda la ampliación de la cámara de combustible para permitir una mayor cantidad de combustible, y por consiguiente evitar múltiples recargas.
- Se sugiere un estudio más profundo sobre el diseño del quemador, especialmente en la regulación del aire primario que permita adaptarse a diferentes necesidades de operación, tales como intensidad y tamaño de la llama.



BIBLIOGRAFIA

1. AGUSTIN VALVERDE, BIENVENIDO SARRIA y José MONTEAGUDO
2007 *Análisis comparativo de las características fisicoquímicas de la cascarilla de arroz*. Colombia. Consulta: 15 de julio del 2012
<<http://www.slideshare.net/segundocorreamorán/cascarilla-de-arroz>>
2. Assureira, Estela
2001 *Utilización de la cascarilla de arroz como fuente alterna de energía con bajo impacto ambiental*. Lima.
3. BASU, Prabir.
2006 *Combustion and gasification in fluidized beds*. Boca Raton, FL: Taylor & Francis
4. BELONIO Alexis T.
2005 *Rice husk gas stove handbook*. Iloilo Consulta: 2 de junio del 2012
<http://www.bioenergylists.org/stovesdoc/Belonio/Belonio_gasifier.pdf>
5. BELONIO, Alexis T.
2006 *Super turbo rice husk quasi gasifier stove*, Iloilo.
Consulta: 2 de junio del 2012
<<http://www.bioenergylists.org/files/SUPER%20TURBO%20RICE%20HUSK%20QUASI%20GASIFIER.pdf>>
6. BELONIO Alexis , Rustamadji, y BimaTahar
2009 *A three-burner rice husk gas stove developed in Indonesia, Tangerang*. Consulta: 2 de junio del 2012
<<http://www.cc.cc/g1g265546>>
7. BELONIO Alexis , Rustamadji, y BimaTahar
2009 *Two burners rice husk gas stove for domestic or institutional cooking operation, Tangerang*. Consulta: 2 de junio del 2012
<http://www.bioenergylists.org/stovesdoc/approtech/Two_Burner_Rice_Husk_Gas_Stove1.pdf>
8. Biomass technology group
2008 *BTG Biomass Gasification*. Enschede. Consulta: 15 de mayo del 2012
<<http://www.btgworld.com/uploads/documents/Gasification%20Attachment%20Website%20v2.pdf>>

9. BHATTACHARYA y Augustus LEON
2001 *A biomass-fired gasifier stove (IGS-2) for institutional cooking.*
Yogyakarta. Consulta : 2 de junio del 2012
<http://www.retsasia.ait.ac.th/Publications/Glow_Indonesia.pdf>
10. GARAY CASTRO, Camila, Carlos GUEVARA CERNA y Jorge SORTO MACHADO
2008 *Desarrollo de una nueva cocina mejorada para leña basada en el principio de gasificación de flujo cruzado natural.* Tesis de licenciatura en la facultad de ingeniería y arquitectura con mención en Ingeniería Mecánica. Antiguo Cuscatlan, El salvador: UNIVERSIDAD CENTROAMERICACA “JOSE SIMEON CAÑAS”, Consulta: Abril del 2010<http://cef.uca.edu.sv/descargables/tesis_descargables/cocina_mejorada.pdf>
11. GARCIA Jose
2001 *Quemadores* Consulta: 1 de junio del 2012
<<http://www.energia.inf.cu/ieemep/SyT/CDG/Taller1BURE/QUEMADORES.PDF>>
12. Grupo de investigación y desarrollo en carbón y biocombustibles
2007 *Densificados para uso energético empleando residuos agrícolas y Forestales* [diapositivas]. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú. Consulta: 1 de junio del 2012
<<http://www.hechoenperu.org.pe/cober2008/Foro7/Estela%20AssureirAssureira.swf>>
13. HughRudnick
2008 *Tecnologías Modernas de Plantas Termoeléctricas a Carbón, Impacto en el Medio Ambiente y Costos.* Santiago de Chile
Consulta: 24 de junio del 2012
<<http://web.ing.puc.cl/~power/mercados/carbon/carbon.htm>>
14. KAUPP, Albrecht
1984 *Gasification of rice hulls: theory and practice.* Primera edición.
Braunschweig ; Wiesbade: Vieweg
15. LEON, Juan
2001 *Diseño y cálculo de recipientes a presión,* Primera edición
Inglesa; Lima
16. MARQUEZ, Manuel
2005 *Combustión y quemadores,* Primera edición. España:
Marcombo

17. Ministerio de Agricultura
2011 *Estadística agraria mensual*. Lima
<http://www.minag.gob.pe/portal/download/pdf/herramientas/bol-etines/boletineselectronicos/estadisticaagrariamensual/2011/bemsa_dic2011_modif.pdf >
18. Obernberger, Ingwald
2006 *Chemical properties of solid biofuels - significance and impact*,
Volume 30, número 11, pp 5-11.
19. Proyecto Carbon
Resultados del análisis inmediato de la cascarilla de arroz.
Lima
20. QUAAK , Peter
1999 *Energy from biomass: a review of combustion and gasification technologies*.The world bank. Washington.
21. REED, Thomas B.
2007 *Encyclopedia of biomass thermal conversion : the principles and technology of pyrolysis, gasification & combustion*. Tercera
22. REED, Thomas B.
2007 *Handbook of biomass downdraft gasifier engine systems*.
23. Resource Efficient Agricultural Production
2001 *Mayon Turbo Stove*, Filipina. Consulta: 2 de junio del 2012
<http://www.reap-canada.com/bio_and_climate_3_3_1.htm>
24. Rodriguez A. ,Jorge
Introducción a la Termodinámica
<http://www.radiadoresgallardo.cl/topintercambiaodres.pdf>
25. RODRIGUEZ H., Jorge
2008 *Resistencia de materiales 2*. Lima: PUCP
26. SAMILLAN, Richard
Características de los G.L.P. Consulta: 10 de septiembre del 2012
<<http://www.unprg.edu.pe/bounprg/blogs/media/blogs/rsamillanri/DMecanico/simbologia.pdf>>
27. Tata Energy Research Institute
2005 *Efficiency Measurement of Biogas, Kererosene and LPG Stoves*, Filipina. Consulta: 2 de junio del 2012
<http://www.snvworld.org/en/Documents/Efficiency_measurement_of_biogas_kerosene_and_LPG_stoves_Nepal_2001.pdf>

28. VENTURA VERME, Mario

1992 *Diseño de una planta piloto para gasificar carbón antracítico que permitirá el accionamiento de un motor de combustión de 20kW.* Tesis de licenciatura en Ciencias e Ingeniería con mención en Ingeniería Mecánica. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú, Facultad de Ciencias e Ingeniería.

