



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE CIENCIAS
CARRERA INGENIERÍA QUÍMICA

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN GASIFICADOR PARA EL
APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO DE BIOMASA**

Trabajo de Integración Curricular

Tipo: Proyecto Técnico

Presentado para optar al grado académico de:

INGENIERO QUÍMICO

AUTORES: FABRICIO ARSENIO NOTENO BAUTISTA

LUIS SEBASTIAN ZAPATA TRUJILLO

DIRECTOR: Ing. PAÚL GUSTAVO PALMAY PAREDES MSc.

Riobamba – Ecuador

2022

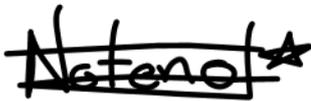
© 2022, Fabricio Arsenio Noteno Bautista & Luis Sebastián Zapata Trujillo

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor.

Nosotros, FABRICIO ARSENIO NOTENO BAUTISTA y LUIS SEBASTIAN ZAPATA TRUJILLO, declaramos que el presente Trabajo de Integración Curricular es de nuestra autoría y los resultados de este son auténticos. Los textos en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

Como autores asumimos la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este Trabajo de Integración Curricular. El patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Riobamba, 17 de noviembre de 2022.

A handwritten signature in black ink that reads "Noteno" with a star symbol at the end. The signature is written in a cursive style and is underlined.

Fabricio Arsenio Noteno Bautista

210104649-4

A handwritten signature in black ink that reads "Luis Sebastián Zapata Trujillo". The signature is written in a cursive style and is underlined.

Luis Sebastián Zapata Trujillo

050325276-9

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE CIENCIAS
CARRERA INGENIERÍA QUÍMICA

El Tribunal del Trabajo de Integración Curricular certifica que: el Trabajo de Integración Curricular; Tipo: Proyecto Técnico, **DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN GASIFICADOR PARA EL APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO DE BIOMASA**, realizado por los señores: **FABRICIO ARSENIO NOTENO BAUTISTA** y **LUIS SEBASTIAN ZAPATA TRUJILLO**, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal del Trabajo de Integración Curricular, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal Autoriza su presentación.

| | FIRMA | FECHA |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| Ing. Mabel Mariela Parada Rivera MSc. PRESIDENTE DEL TRIBUNAL |  | 2022-11-17 |
| Ing. Paúl Gustavo Palmay Paredes MSc. DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR |  | 2022-11-17 |
| Ing. Mónica Lilian Andrade Avalos MSc. ASESOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR |  | 2022-11-17 |

DEDICATORIA

Dedico esta tesis a mis padres, Lorenzo Noteno y Dina Bautista por ser los pilares más importantes en mi vida, gracias a su amor, apoyo, consejos, motivación y enseñanzas me han sabido formar en el hombre que soy ahora. Reconozco sus constantes esfuerzos por ayudarme a alcanzar mis metas y solo le pido a Dios que me brinde el tiempo suficiente para devolverles todo el amor y cariño que me han brindado y hacerlos sentir orgullosos. A mis hermanos Fredy y Franklin Noteno, que siempre me han apoyado en los momentos que más he necesitado y que nunca dudaron de mi capacidad y perseverancia para alcanzar mis metas. A mi sobrino Dylan, por los buenos momentos de alegrías y sonrisas que trajo a mi vida.

Fabrizio

Quiero dedicar este enorme logro a mis padres, Gabriel Zapata por su apoyo y amor incondicional a lo largo de mi formación tanto personal como académica, a Elena Trujillo por ser un ángel que me cuida día a día y guía mis pasos por el camino del bien. A mi hermano Gabriel que siempre ha estado a mi lado en todo momento. A mi primo José que se ha convertido en un hermano, de manera muy especial también dedico este trabajo a Graciela Zapata quien es un pilar muy importante en mi vida. Finalmente, a mi abuelo Luis Alberto quien en vida fue un ejemplo a seguir y al que extraño día a día. A todos los quiero demasiado y espero que Dios guie mi vida por el camino del éxito para retribuirles todo lo que algún día hicieron por mí.

Sebastián

AGRADECIMIENTO

A la emblemática Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, por abrirnos sus puertas para formarnos como profesionales y así aportar a la sociedad y al país. A todos los docentes que impartieron sus destacados conocimientos a lo largo de nuestra formación académica y profesional. De manera muy especial a nuestro director Ing. Paúl Palmay y miembro Ing. Mónica Andrade, excelentes docentes, seres humanos y principales colaboradores con este trabajo de integración curricular, quienes siempre estuvieron dispuestos a colaborar en la realización del mismo.

Fabricio & Sebastián

ÍNDICE DE CONTENIDO

| | |
|------------------------------|------|
| ÍNDICE DE TABLAS..... | x |
| ÍNDICE DE ILUSTRACIONES..... | xi |
| ÍNDICE DE ANEXOS..... | xiii |
| RESUMEN..... | xiv |
| ABSTRACT..... | xv |
| INTRODUCCIÓN..... | 1 |

CAPÍTULO I

| | |
|-------------------------------------------|---|
| 1. DIAGNÓSTICO DEL PROBLEMA..... | 3 |
| 1.1. Antecedentes..... | 3 |
| 1.2. Planteamiento del problema..... | 3 |
| 1.3. Justificación..... | 4 |
| 1.4. Objetivos..... | 5 |
| 1.4.1. <i>Objetivo general</i> | 5 |
| 1.4.2. <i>Objetivos específicos</i> | 5 |

CAPÍTULO II

| | |
|--------------------------------------------------------------|----|
| 2. MARCO TEÓRICO..... | 6 |
| 2.1. Antecedentes de investigación..... | 6 |
| 2.2. Referencias teóricas..... | 7 |
| 2.2.1. <i>Biomasa</i> | 7 |
| 2.2.2. <i>Tipos de biomasa</i> | 7 |
| 2.2.3. <i>Procesos de conversión</i> | 8 |
| 2.2.3.1. <i>Procesos de combustión directa</i> | 8 |
| 2.2.3.2. <i>Procesos termoquímicos</i> | 9 |
| 2.2.3.3. <i>Procesos bioquímicos</i> | 10 |
| 2.2.4. <i>Gasificación de la biomasa</i> | 11 |
| 2.2.5. <i>Agentes gasificantes</i> | 12 |
| 2.2.6. <i>Termoquímica del proceso de gasificación</i> | 13 |
| 2.2.6.1. <i>Reacciones del proceso de gasificación</i> | 13 |
| 2.2.7. <i>Etapas del proceso de gasificación</i> | 14 |
| 2.2.7.1. <i>Secado</i> | 15 |

| | | |
|----------|--------------------------------------------------------------|----|
| 2.2.7.2. | <i>Pirolisis</i> | 15 |
| 2.2.7.3. | <i>Oxidación o combustión</i> | 16 |
| 2.2.7.4. | <i>Reducción – gasificación del residuo carbonoso</i> | 16 |
| 2.2.8. | <i>Tipos de gasificadores</i> | 17 |
| 2.2.8.1. | <i>Lecho móvil en contracorriente o updraft</i> | 17 |
| 2.2.8.2. | <i>Lecho móvil en corrientes paralelas o downdraft</i> | 18 |
| 2.2.8.3. | <i>De lecho fluidizado</i> | 19 |
| 2.2.8.4. | <i>De lecho arrastrado</i> | 20 |
| 2.2.9. | <i>Comparación entre los gasificadores</i> | 21 |
| 2.2.10. | <i>Variables de diseño de gasificadores</i> | 22 |

CAPÍTULO III

| | | |
|----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3. | MARCO METODOLÓGICO | 24 |
| 3.1. | Caracterización de la biomasa | 24 |
| 3.1.1. | <i>Variables físicas</i> | 24 |
| 3.1.1.1. | <i>Densidad</i> | 24 |
| 3.1.1.2. | <i>Humedad</i> | 25 |
| 3.1.2. | <i>Variables químicas</i> | 25 |
| 3.1.2.1. | <i>Cenizas</i> | 25 |
| 3.1.2.2. | <i>Material volátil</i> | 26 |
| 3.1.2.3. | <i>Carbón fijo</i> | 28 |
| 3.1.2.4. | <i>Capacidad calorífica de la biomasa</i> | 28 |
| 3.1.2.5. | <i>Composición elemental de la biomasa</i> | 29 |
| 3.2. | Ingeniería del proyecto | 29 |
| 3.2.1. | <i>Resultados de la caracterización de la biomasa</i> | 29 |
| 3.2.2. | <i>Selección del tipo de gasificador a construir</i> | 30 |
| 3.2.3. | <i>Cálculos para el diseño del gasificador</i> | 31 |
| 3.2.3.1. | <i>Principales dimensiones de gasificadores para astillas de madera</i> | 32 |
| 3.2.3.2. | <i>Altura cámara de residuos</i> | 33 |
| 3.2.3.3. | <i>Altura depósito de biomasa</i> | 34 |
| 3.2.3.4. | <i>Relación entre la superficie de salida de la tobera, A_n, y la superficie de la garganta, A_t, en función del diámetro de la garganta</i> | 35 |
| 3.2.3.5. | <i>Cálculo del diámetro de la tubería de salida del gas</i> | 36 |
| 3.2.3.6. | <i>Determinación de la formula empírica de la madera</i> | 38 |
| 3.2.3.7. | <i>Relación aire/combustible para la combustión de la madera</i> | 38 |
| 3.2.3.8. | <i>Cálculo velocidad y flujo volumétrico del aire</i> | 39 |

| | | |
|-----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.2.3.9. | <i>Balance de energía</i> | 40 |
| 3.3. | Selección de materiales | 41 |
| 3.3.1. | <i>Acero A36</i> | 41 |
| 3.3.1.1. | <i>Calculo espesor de las paredes</i> | 42 |
| 3.3.2. | <i>Acero inoxidable AISI 430</i> | 42 |
| 3.3.3. | <i>Hierro galvanizado</i> | 43 |
| 3.3.4. | <i>Aislantes térmicos</i> | 43 |
| 3.3.4.1. | <i>Mortero refractario</i> | 44 |
| 3.3.4.2. | <i>Lana de vidrio</i> | 45 |
| 3.4. | Forma definitiva del diseño a construir | 45 |
| 3.5. | Construcción del gasificador | 47 |
| 3.5.1. | <i>Cámara de combustión</i> | 47 |
| 3.5.2. | <i>Cámara de reducción</i> | 47 |
| 3.5.3. | <i>Parrilla y mecanismo de agitación</i> | 48 |
| 3.5.4. | <i>Mecanismos para variar la altura de la entrada de aire y el volumen de la cámara de reducción</i> | 49 |
| 3.5.5. | <i>Cilindros</i> | 49 |
| 3.5.6. | <i>Tapa superior e inferior</i> | 50 |
| 3.5.7. | <i>Tapas de alimentación y residuos</i> | 50 |
| 3.5.8. | <i>Aislantes térmicos</i> | 51 |
| 3.5.9. | <i>Estructura de soporte del equipo</i> | 52 |
| 3.5.10. | <i>Tubos y accesorios</i> | 52 |
| 3.5.11. | <i>Equipos</i> | 53 |
| 3.5.11.1. | <i>Corte</i> | 53 |
| 3.5.11.2. | <i>Soldadura</i> | 53 |
| 3.5.11.3. | <i>Rolado</i> | 54 |
| 3.5.11.4. | <i>Perforaciones</i> | 54 |
| 3.5.12. | <i>Sistema eléctrico</i> | 55 |
| 3.5.12.1. | <i>Termocuplas</i> | 55 |
| 3.5.12.2. | <i>Controladores</i> | 56 |
| 3.5.12.3. | <i>Blower</i> | 56 |
| 3.6. | Costos | 57 |
| 3.6.1. | <i>Costos construcción del gasificador</i> | 57 |
| 3.6.2. | <i>Costos instalación eléctrica</i> | 58 |
| 3.6.3. | <i>Otros costos</i> | 59 |
| 3.6.4. | <i>Costo total</i> | 59 |
| 3.7. | Parámetros de funcionamiento del equipo | 59 |

| | | |
|-----------------|------------------------------------------------------------------|----|
| 3.7.1. | <i>Operación del equipo</i> | 59 |
| 3.7.1.1. | <i>Encendido</i> | 59 |
| 3.7.1.2. | <i>Encendido del gas</i> | 61 |
| 3.7.1.3. | <i>Apagado</i> | 62 |
| 3.7.1.4. | <i>Limpieza del equipo</i> | 62 |
| 3.7.2. | <i>Capacidad del equipo</i> | 63 |
| 3.7.3. | <i>Medidas de prevención</i> | 63 |
| 3.7.4. | <i>Mantenimiento del equipo</i> | 63 |
| 3.8. | Pruebas en el gasificador | 64 |
| 3.8.1. | <i>Condiciones estándar de funcionamiento</i> | 64 |
| 3.8.2. | <i>Variación en la cámara de reducción</i> | 65 |
| 3.8.3. | <i>Variación en la altura de la entrada de aire</i> | 66 |
| 3.8.4. | <i>Variación flujo de aire</i> | 66 |
| 3.8.5. | <i>Variación en la cantidad de biomasa empleada</i> | 67 |

CAPÍTULO IV

| | | |
|-------------|---------------------------------------------------------------|----|
| 4. | MARCO DE ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS | 68 |
| 4.1. | Resultados | 68 |
| 4.2. | Balance de masa del proceso de gasificación | 70 |
| 4.3. | Balance de masa por componentes | 71 |
| 4.4. | Discusión | 72 |

| | | |
|--|---------------------------|----|
| | CONCLUSIONES | 74 |
|--|---------------------------|----|

| | | |
|--|------------------------------|----|
| | RECOMENDACIONES | 75 |
|--|------------------------------|----|

BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS

ÍNDICE DE TABLAS

| | | |
|--------------------|------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 1-2: | Estados típicos de la biomasa | 8 |
| Tabla 2-2: | Uso directo de desechos sólidos | 9 |
| Tabla 3-2: | Criterios de comparación entre gasificadores | 21 |
| Tabla 1-3: | Datos densidad de la madera | 24 |
| Tabla 2-3: | Mediciones y simbología | 26 |
| Tabla 3-3: | Resultados de laboratorio | 26 |
| Tabla 4-3: | Mediciones y simbología | 27 |
| Tabla 5-3: | Resultados de laboratorio | 27 |
| Tabla 6-3: | Resultados capacidad calorífica de la madera | 29 |
| Tabla 7-3: | Composiciones elemental madera de eucalipto | 29 |
| Tabla 8-3: | Resultados de la caracterización de la biomasa | 29 |
| Tabla 9-3: | Selección del tipo de gasificador | 30 |
| Tabla 10-3: | Dimensiones principales de gasificadores para astillas de madera | 32 |
| Tabla 11-3: | Dimensiones principales del tipo de gasificador elegido | 32 |
| Tabla 12-3: | Cálculo fórmula empírica de la madera | 38 |
| Tabla 13-3: | Propiedades del Acero A36 | 41 |
| Tabla 14-3: | Composición química acero AISI 430 | 43 |
| Tabla 15-3: | Termocuplas características | 55 |
| Tabla 16-3: | Controladores características | 56 |
| Tabla 17-3: | Velocidad del aire que expulsa el blower sin la T | 56 |
| Tabla 18-3: | Velocidad del aire que expulsa el blower con la T | 57 |
| Tabla 19-3: | Costos construcción del gasificador | 57 |
| Tabla 20-3: | Costos instalación eléctrica | 58 |
| Tabla 21-3: | Otros costos | 59 |
| Tabla 22-3: | Costo total | 59 |
| Tabla 1-4: | Especificaciones gasificador downdraft | 69 |
| Tabla 2-4: | Resultados cromatografía de gases del gas pobre | 72 |

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

| | | |
|--------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Ilustración 1-2: | Procesos de conversión y formas de energía | 8 |
| Ilustración 2-2: | Esquema general del proceso de gasificación | 12 |
| Ilustración 3-2: | Clasificación de las principales reacciones en un proceso de gasificación (reacción exotérmica, reacción endotérmica) | 14 |
| Ilustración 4-2: | Entradas, salidas y reacciones de las etapas del proceso de gasificación (reacción exotérmica, reacción endotérmica) | 15 |
| Ilustración 5-2: | Flujo de materia y perfiles de temperatura y conversión en un reactor updraft | 18 |
| Ilustración 6-2: | Flujo de materia y perfiles de temperatura y conversión | 19 |
| Ilustración 7-2: | Tipos de gasificadores downdraft | 19 |
| Ilustración 8-2: | Flujo de materia y perfiles de temperatura en un reactor de lecho fluidizado | 20 |
| Ilustración 9-2: | Flujo de materia en un reactor de lecho arrastrado | 21 |
| Ilustración 1-3: | Termobalanza RADWAG | 25 |
| Ilustración 2-3: | Gasificador a construir | 31 |
| Ilustración 3-3: | Dimensiones zona de combustión y reducción | 33 |
| Ilustración 4-3: | Directrices de diseño para gasificadores de tiro descendente a relación entre el área de la salida de la tobera y el área en función del diámetro de la garganta | 35 |
| Ilustración 5-3: | Simulación en SOLIDWORKS del gasificador a construir | 46 |
| Ilustración 6-3: | Corte transversal del gasificador a construir | 46 |
| Ilustración 7-3: | Cámara de combustión | 47 |
| Ilustración 8-3: | Cámara de reducción | 48 |
| Ilustración 9-3: | Parrilla vista inferior | 48 |
| Ilustración 10-3: | Agitador y volante | 49 |
| Ilustración 11-3: | Mecanismo para variar el volumen de la cámara de reducción | 49 |
| Ilustración 12-3: | Cilindro A36 y cilindro AISI 430 | 50 |
| Ilustración 13-3: | Bridas tapa superior | 50 |
| Ilustración 14-3: | Brida rectangular alimentación | 51 |
| Ilustración 15-3: | Lana de vidrio | 51 |
| Ilustración 16-3: | Tapa desmontable del mortero refractario | 52 |
| Ilustración 17-3: | Estructura de soporte del equipo | 52 |
| Ilustración 18-3: | Tubo de alimentación de aire y salida del gas | 53 |
| Ilustración 19-3: | Corte con plasma | 53 |

| | | |
|--------------------------|--------------------------------------------------------------------|----|
| Ilustración 20-3: | Soldadura MIG y soldadura TIG | 54 |
| Ilustración 21-3: | Roladora | 54 |
| Ilustración 22-3: | Taladro de pedestal | 55 |
| Ilustración 23-3: | Tablero de control | 55 |
| Ilustración 24-3: | Diagrama de flujo encendido del equipo | 61 |
| Ilustración 25-3: | Parámetros que se pueden variar en el equipo de gasificación | 65 |
| Ilustración 1-4: | Balance de masa en el proceso de gasificación | 70 |
| Ilustración 2-4: | Balance de masa por componentes | 71 |

ÍNDICE DE ANEXOS

- ANEXO A:** FICHA TÉCNICA MORTERO REFRACTARIO
- ANEXO B:** FICHA TÉCNICA LANA DE VIDRIO
- ANEXO C:** CROMATOGRAFÍA DE GASES DEL GAS POBRE
- ANEXO D:** GASIFICADOR CONSTRUIDO
- ANEXO E:** GASIFICADOR EN FUNCIONAMIENTO
- ANEXO F:** BIOMASA A GASIFICAR (TRITURADO DE EUCALIPTO)
- ANEXO G:** VALIDACIÓN DEL GASIFICADOR
- ANEXO H:** ACTA DE VALIDACIÓN DEL GASIFICADOR CONSTRUIDO

RESUMEN

En el presente Trabajo de Integración Curricular se ejecutó el diseño y construcción de un gasificador para el aprovechamiento energético de biomasa. En primer lugar, se realizó la caracterización de las propiedades físicas y químicas de la biomasa a gasificar. Posterior a ello, mediante criterios de selección se determinó construir un gasificador de tiro invertido o downdraft para su uso práctico a nivel de laboratorio. Para el dimensionamiento de la cámara de combustión y reducción se hizo uso de una tabla de dimensiones estandarizadas de gasificadores, que parte desde el consumo de biomasa en carga máxima del equipo, el cual se estableció de 25 kg/h; a continuación, se efectuó cálculos de ingeniería para el dimensionamiento de los demás componentes. Para la selección de materiales se consideró las propiedades, costos y su disponibilidad en el mercado nacional. Se procedió con la elaboración de un modelo en 3D el cual permitió reconocer las dimensiones finales del equipo de gasificación construido. El resultado final fue un gasificador downdraft diseñado con una entrada de aire central por la parte superior a la cámara de combustión, además, cuenta con una parrilla móvil que permite regular el volumen de la cámara de reducción. Se realizó pruebas de funcionamiento del equipo, donde se gasificó 5 kg/h de biomasa de eucalipto con 37,5 kg/h de aire para generar 0,241 kg/h de residuos y 42,26 kg/h de gas pobre, el cual es un gas de tipo combustible; por lo que se cumplió con el objetivo de aprovechar energéticamente la biomasa. Se recomienda implementar más sensores de temperatura para un mayor control y registro de datos en las diferentes etapas del proceso de gasificación.

Palabras clave: <BIOMASA>, <GASIFICACIÓN>, <GAS POBRE>, <COMBUSTIÓN>, <DOWNDRAFT>, <PROCESO TERMOQUÍMICO>, <REACCIONES TERMOQUÍMICAS>.

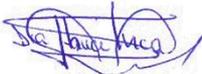


2416-DBRA-UTP-2022

ABSTRACT

In this Curricular Integration Project, the design and construction of a gasifier for the energetic use of biomass was carried out. First of all, the physical and chemical properties of the biomass to be gasified were characterized. Subsequently, by means of selection criteria, it was determined to build an inverted draft or downdraft gasifier for practical use at the laboratory level. For the sizing of the combustion and reduction chamber, a standardized table of gasifier dimensions and reduction, a table of standardized dimensions of gasifiers was used, starting from the biomass consumption at maximum load of the equipment, which was set at 25 kg/h; then, engineering calculations were made for the sizing of the other components. For the materials selection, the properties, costs and availability in the domestic market were considered. We proceeded with the elaboration of a 3D model which allowed us to recognize the final dimensions of the gasification equipment built. The final result was a downdraft gasifier designed with a central air inlet at the top of the combustion chamber to the combustion chamber, in addition, it has a mobile grill that allows regulating the volume of the reduction chamber. The equipment was tested, where 5 kg/h of eucalyptus biomass was gasified with 37.5 kg/h of air to generate 0.241 kg/h of waste and 42.26 kg/h of lean gas, which is a combustible gas; therefore, the objective of using the biomass as energy was achieved. It is recommended to implement more temperature sensors for better control and data recording in the different stages of the gasification process.

Key words: <BIOMASS>, <GASIFICATION>, <WET GAS>, <COMBUSTION>, <DOWNDRAFT>, <THERMOCHEMICAL PROCESS>, <THERMOCHEMICAL REACTIONS>.


Nanci Margenta Inca Ch.
0602926719

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo de titulación está encaminado en el diseño y construcción de un equipo de gasificación de biomasa, en el que se pueda aprovechar residuos sólidos orgánicos para procesos termoquímicos de gasificación y de esa forma generar biocombustibles como el gas pobre. La biomasa empleada para el proceso, son los residuos forestales del eucalipto, pero el equipo está diseñado para cualquier tipo de biomasa que cumpla con las condiciones necesarias para la gasificación.

El eucalipto es un árbol maderable ampliamente utilizado, que a la vez genera grandes cantidades de residuos, por ejemplo, en la ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DE CHIMBORAZO, se generan estos residuos debido a la limpieza y poda de estos árboles. En la actualidad se generan gran cantidad de residuos orgánicos tanto de la actividad forestal como de la actividad agrícola, es preciso efectuar una gestión para estos desechos, evitando la proliferación bacteriana y a la vez la contaminación ambiental. La gasificación de biomasa se plantea como una alternativa viable de aprovechamiento de estos residuos. La creciente necesidad de más fuentes de energía encamina a los ingenieros a estudiar nuevas tecnologías que sustituyan al petróleo, debido a que se trata de un recurso efímero y contaminante, la ciencia busca aprovechar las fuentes naturales de energía que son más amigables con el ambiente, el único problema con estas fuentes son sus limitaciones meteorológicas que no son aprovechables cuando no existen las condiciones ideales. El proceso de obtención de un gas pobre se plantea como una alternativa viable, poco limitada y amigable con el ambiente.

Lo que se busca con la presente tesis, es proporcionar a la facultad de ciencias y en especial a los estudiantes de ingeniería química, un equipo didáctico con el que puedan aprender sobre procesos termoquímicos de gasificación y también, que este equipo sea el primero de un sistema de equipos que permita obtener un combustible más aprovechable. Como referencia, los gasificadores han sido utilizados durante muchos años como equipos de generación de energía. En la facultad de mecánica de la ESPOCH, se cuenta con un sistema de obtención de gas pobre, este equipo es a gran escala. Por otro lado, el equipo de gasificación a pequeña escala a construirse está encaminado para investigaciones y prácticas de laboratorio.

Mediante revisión bibliográfica, se fundamenta el diseño del equipo de gasificación, también se realizó pruebas de laboratorio para la determinación de las características tanto físicas como químicas de la biomasa. Se realizó un estudio bibliográfico para el reconocimiento de las variables de diseño y después se realizó los cálculos de las dimensiones del equipo, lo que se empleó a la vez para elaborar un SolidWorks que represente el diseño final a construirse. Para la construcción se empleó una selección de materiales en base a bibliografía, mismas que fundamentan el uso del acero A36 de 4mm de espesor para para la construcción del equipo. Finalmente se describen los parámetros de funcionamiento del equipo en donde se puede observar el encendido del equipo, el

encendido del gas, apagado del equipo y limpieza, así como también se presenta las medidas de prevención y mantenimiento del equipo.

CAPÍTULO I

1. DIAGNÓSTICO DEL PROBLEMA

1.1. Antecedentes

La gasificación de biomasa es un proceso termoquímico que convierte a los residuos sólidos orgánicos en gases pobres de bajo poder calorífico, para que puedan ser aprovechados como una alternativa de producción de energía amigable con el ambiente. Estos residuos orgánicos se los denomina biomasa y en su mayoría se los consideran desechos de residuos forestales, agrícolas, industriales o domésticos (Cabezas, 2019, p.18).

La biomasa fue el primer combustible en ser aprovechado por el hombre en la cocción de alimentos, calefacción de hogares y más adelante como combustible para accionar máquinas a vapor. La madera es una importante fuente de combustible sólido renovable, que gracias a sus múltiples funcionalidades lo hace ideal para aprovecharlos en diferentes procesos como: carbonización, fermentación, pirólisis o gasificación, siendo este último el proceso en el que aprovecha el gas de síntesis con alto poder calórico.

La gasificación de biomasa es una tecnología ampliamente usada a finales del siglo XIX para la calefacción de hogares, durante el siglo XX en la Segunda Guerra Mundial, los gasificadores adquirieron un papel protagónico como generadores de combustible para algunos vehículos de la época (FAO, 1986, p. 9). Los primeros gasificadores de carbón se construyeron en Alemania por Bischof en 1839 y por Siemens en 1861. En Francia y en Suiza se utilizaba gas de madera como combustible, el cual era generado por gasificación a partir del carbón vegetal (Villacís, 2016, p.32).

En la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Mecánica existe un gasificador de biomasa forestal a escala industrial el cual ha permitido a sus estudiantes conocer de forma práctica el proceso de gasificación. Es importante que otras carreras ingenieriles conozcan este tipo de tecnología que busca dar solución a la problemática de dependencia de los combustibles fósiles procedentes del proceso de refinación del petróleo.

1.2. Planteamiento del problema

La Facultad de Ciencias no cuenta con un gasificador de biomasa que permita a los estudiantes conocer este proceso termoquímico. Dentro de la carrera de Ingeniería Química se estudian diferentes procesos de transformación de materias primas encaminados en la elaboración de productos con mayor valor agregado. La gasificación es el proceso que aprovecha residuos sólidos orgánicos vegetales para generar gas pobre, el cual puede ser empleado como un combustible gaseoso gracias a su determinado poder calorífico.

En la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo existen residuos sólidos orgánicos generados de la limpieza y poda de las áreas forestales, estos residuos se deben gestionar y controlar para no dar paso a la proliferación bacteriana y por ende a la contaminación ambiental, puesto que toda falta de gestión respecto a residuos orgánicos puede converger en la contaminación de las aguas superficiales, aguas subterráneas, suelo y aire, así como impactos potencialmente peligrosos sobre la salud humana y emisiones de CO₂ (Borja, 2021, p. 9).

En la actualidad por la alta demanda energética de algunas industrias, los elevados precios de los combustibles fósiles y su gran impacto ambiental, surge la necesidad de estudiar fuentes de energías alternas amigables con el ambiente que minimicen la dependencia del petróleo. El estudio exhaustivo de estas fuentes de energía alternas ha dado como resultado la generación de energías renovables como la eólica, solar, hidráulica, undimotriz, geotérmica, entre otras, con mayor o menor disponibilidad y factibilidad. Sin embargo, estas fuentes de energía están sujetas a limitaciones, meteorológicas, geológicas y uso geográfico; razón porque de todas las alternativas de energías renovables, la biomasa se destaca por ser la única que no presenta ningún tipo de limitación (Nunes, 2022, p. 35).

1.3. Justificación

La gasificación de biomasa se plantea como una respuesta favorable a la problemática ya mencionada, ya que es un proceso mediante el cual los residuos sólidos forestales se pueden aprovechar transformándose a biocombustibles, biocarbón, gas de síntesis, energía, calor y fertilizantes (AlNouss et al., 2019: pp. 301-306). Todos estos beneficios fundamentan al proceso de gasificación de biomasa como un sustituto viable al uso de combustibles fósiles. Estudios han revelado que la falta de gestión y el inadecuado almacenamiento de la materia orgánica cortada de los árboles después del trabajo de poda, genera problemas ambientales. Por esta razón se estudia el proceso termoquímico de la gasificación para aprovechar estos residuos de poda de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo de una forma rentable, práctica y viable.

El presente trabajo de titulación busca diseñar y construir un gasificador de biomasa para el aprovechamiento energético de residuos sólidos forestales de eucalipto, el dimensionamiento del equipo es en base a recursos bibliográficos confiables como tesis, artículos, libros o revistas relacionados con el diseño y construcción de gasificadores. Se efectuarán análisis de laboratorio para caracterizar las propiedades físicas y químicas la biomasa y fundamentar los criterios de diseño.

El diseño y construcción del equipo servirá como base para futuras investigaciones encaminadas al aprovechamiento energético de biomasa y ofrece beneficios directos en la comunidad académica comprendida entre estudiantes, docentes e investigadores de la Facultad de Ciencias,

carrera de Ingeniería Química, específicamente en las cátedras de: Operaciones Unitarias, Transferencia de masa y Calor, Termodinámica y Sostenibilidad Ambiental.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Diseñar y construir un gasificador para el aprovechamiento energético de biomasa.

1.4.2. Objetivos específicos

- Caracterizar física y químicamente la biomasa a usarse en el proceso de gasificación.
- Determinar las variables de diseño del equipo.
- Aplicar los cálculos de ingeniería para el diseño del gasificador.
- Validar el diseño y construcción del equipo mediante el funcionamiento del mismo ante un comité de validación.

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de investigación

La Escuela Superior Politécnica de Chimborazo efectúa mantenimiento de poda de las distintas áreas verdes con el intención de mejorar la calidad de crecimiento, generar un mejor aspecto ornamental y salvaguardar la integridad física de sus estudiantes, estos mantenimientos generan grandes volúmenes de residuos sólidos forestales los mismos que son calificados como material de desecho, los residuos de poda son elementos con alto potencial energético ideales para procesos termoquímicos como la gasificación. Para el presente trabajo de titulación se aprovechará los residuos sólidos forestales de eucalipto debido a su disponibilidad dentro de la institución (Toscano y Vázcones, 2015: p. 23).

La Facultad de Mecánica cuenta con un gasificador de biomasa forestal a escala industrial el cual permite a sus estudiantes adquirir conocimientos de forma práctica sobre el proceso de gasificación de biomasa. A raíz de la construcción del equipo se han derivado varias tesis las cuales se detallan a continuación:

El autor, Herrera (2019, p. 87) en su trabajo de titulación “Análisis térmico de un gasificador tipo downdraft al combustionar residuos forestales”, obtiene un sistema de adquisición de datos para la cuantificación de los parámetros de funcionamiento del equipo.

La autora, Villacís (2016, p. 65) realizó el tema “Diseño de un sistema para la obtención del gas pobre en el gasificador downdraft de la Escuela de Ingeniería Mecánica”, generando así un intercambiador de calor que permitió acondicionar el gas obtenido mediante el proceso de gasificación de biomasa.

Finalmente, el autor, Fonseca (2017, p. 49), en su tema “Diseño y construcción de un dosificador de biomasa forestal para el gasificador tipo downdraft ubicado en el Laboratorio de Térmicas de la Facultad de Mecánica de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo”, obtiene un sistema de dosificación de biomasa automático que facilita la operación del equipo.

Los autores Toscano y Vásconez (2015, p. 67), realizaron una tesis con el tema “Diseño y construcción de un equipo para la reducción de tamaño de los residuos de poda de la ESPOCH” en el que a partir de los cálculos de diseño efectuados por los autores, se dimensionó un triturador que permite una entrada máxima de biomasa de 3 pulgadas, motor de 13 HP con torque de 25 Nm, con un volumen de tolva de 0,06 m³, un sistema de trituración de martillos y cuchillas con velocidad angular y lineal de 376,99 rad/s y 56,55 m/s respectivamente y un rendimiento de 92,31%. Dicho equipo puede ser usado para el acondicionamiento de la biomasa que será

sometida al proceso de gasificación y generando un aprovechamiento energético adecuado de los residuos de poda institucionales, específicamente residuos forestales de eucalipto.

2.2. Referencias teóricas

2.2.1. Biomasa

Se puede definir de una manera muy general a la biomasa como: cualquier sustancia orgánica que contenga compuestos de carbono formados por medio de fotosíntesis. También se considera como biomasa si la sustancia ha sufrido previamente a su uso, algún proceso natural o artificial. Bajo la premisa de esta breve definición se puede pensar en una infinidad de materiales los cuales pueden considerarse como biomasa (Nogués et al., 2010: p. 44).

Por otro lado, el autor Seoáñez Calvo (2013, p. 31) define a la biomasa como: “una fracción biodegradable de productos, subproductos y residuos provenientes de agricultura, incluidas las sustancias animales y vegetales, de la silvicultura y de las industrias de ambas, así como la fracción biodegradable de los residuos industriales y urbanos, sólidos, líquidos y pastosos”.

Basándose en las definiciones antes presentadas, se puede deducir que la energía que contiene la biomasa es prácticamente energía solar la cual es almacenada por fotosíntesis, un proceso en el que los organismos vivos usan luz solar para transformar compuestos inorgánicos en orgánicos llamados carbohidratos. De estos carbohidratos existe la posibilidad de extraer energía, ya sea por medio de un proceso de combustión, convertirlos en un líquido combustible o transformándolos en gas (Carrasco, 2015, p. 14).

2.2.2. Tipos de biomasa

Los diferentes estados físicos de la biomasa determinan su factibilidad técnica y económica para ser usada en un proceso de conversión energética, por lo tanto, la organización Biomass Users Network (BUN-CA, 2002, pp: 11-43) clasifica la biomasa según su estado físico y el tipo de recurso, como se indica a continuación:

Tabla 1-2: Estados típicos de la biomasa

| Recursos de biomasa | Tipo de residuos | Características físicas |
|------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Residuos forestales | Restos de aserrío: corteza, aserrín, astillas. Restos de ebanistería: aserrín, trozos, astillas. Restos de plantaciones: ramas, corteza, raíces. | Polvo, sólido, HR > 50% Polvo, sólido, HR 30 – 45% Sólido, HR > 55% |
| Residuos agropecuarios | Cascara y pulpa de frutas y vegetales. Cascara y polvo de grano secos. Estiércol. Residuos de cosechas | Sólido, alto contenido de humedad Polvo, HR <25% Sólido, alto contenido de humedad Sólido, HR >55% |
| Residuos industriales | Pulpa y cascaras de frutas y vegetales. Residuos de procesamiento de carnes. Aguas de lavado y precocido de carne y vegetales. Grasas y aceites vegetales. | Sólido, humedad moderada Sólido, alto contenido de humedad Líquido Líquido, grasoso |
| Residuos urbanos | Aguas negras. Desechos domésticos orgánicos Basura orgánica | Líquido Sólido, alto contenido de humedad Sólido, alto contenido de humedad |

Fuente: BUN-CA, 2002: pp. 11-43.

Realizado por: Noteno, F; Zapata, S., 2022.

2.2.3. *Procesos de conversión*

La conversión de la biomasa puede ir desde procesos simples como la producción de carbón vegetal o hasta procesos de alta eficiencia, los procesos de: combustión directa, termoquímicos y bioquímicos son los más relevantes.

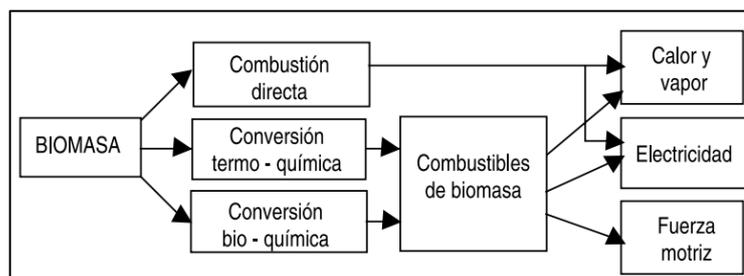


Ilustración 5-2: Procesos de conversión y formas de energía

Fuente: BUN-CA, 2002: pp. 11-43.

2.2.3.1. *Procesos de combustión directa*

Son los más antiguos y su propósito es extraer energía de la biomasa en forma de calor. Estos procesos suelen ser muy ineficientes porque se desperdicia mucha energía y si no se realiza de forma controlada puede contaminar.

- *Densificación*

Es el proceso de compactar la biomasa en “briquetas” con el objetivo de facilitar su uso, almacenamiento, transporte y además aumenta su densidad energética. Entre las materias primas están: aserrín, desechos agrícolas y partículas de carbón vegetal los cuales son compactados a altas presiones (BUN-CA, 2002: pp. 11-43).

Tabla 2-2: Uso directo de desechos sólidos

| Producto | Tecnología | Usos en América Central | Características |
|----------------|----------------------------------------------------|-------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Polvos | Quemadores de polvo | De moderado a bajo | Costo de inversión elevado. Facilita su empleo, incluyendo la escala doméstica. Mejora la eficiencia y las características de la combustión. |
| Astillas | Hornos y calderas en suspensión y lecho fluidizado | De moderado a bajo | |
| Pellets | | | |
| Briquetas | Hornos y calderas en parrilla | De moderado a bajo | |
| Leñosos | Hornos y calderas, estufas domésticas | Amplio | El tamaño dificulta el empleo en dispositivos de alta eficiencia, requiere procedimiento. |
| Carbón vegetal | Estufas domésticas | | Disminuye la eficiencia energética total, pero su uso es más conveniente con menos humo. |

Fuente: BUN-CA, 2002: pp. 11-43.

Realizador por: Noteno, F; Zapata, S., 2022.

2.2.3.2. *Procesos termoquímicos*

En estos procesos se genera un producto con un mejor valor calorífico haciendo su uso más diversificado. Cuando se hace una combustión incompleta y controlada a la biomasa, se genera un fraccionamiento de los compuestos líquidos, sólidos y gaseosos los cuales pueden aprovecharse como combustibles (BUN-CA, 2002: pp. 11-43).

La organización BUN-CA (2002, pp. 11-43) menciona los siguientes procesos termoquímicos:

- *Producción de carbón vegetal*

La biomasa sufre una combustión incompleta en ausencia de aire lo que provoca que se forme un residuo sólido denominado carbón vegetal, con una densidad energética más alta que la de la biomasa original. Generalmente el carbón se obtiene de la madera, pero se puede usar fuentes alternativas como lo son la cascara de coco o residuos agrícolas.

- *Gasificación*

En este proceso se usa mayor cantidad de oxígeno y altas temperaturas para así mejorar la generación del llamado “gas pobre” el cual es un conjunto de elementos y moléculas como: monóxido de carbono (CO), hidrógeno (H₂), metano (CH₄) y bajas cantidades de dióxido de carbono (CO₂) y nitrógeno (N₂). El gas pobre tiene la facilidad de ser usado para generar calor y electricidad. La composición de la biomasa será la que determine la misma composición y poder calorífico del gas. La gasificación presenta múltiples ventajas frente al uso de la biomasa original, entre ellas están:

- El gas que se produce puede tener usos similares al gas natural.
- Puede emplearse para generar calor o vapor, además el gas puede ser utilizado para encender motores de combustión interna y turbinas que generen electricidad.
- La combustión del gas está casi libre de impurezas y causa un porcentaje bajo de contaminación.

2.2.3.3. *Procesos bioquímicos*

En estos procesos se usa la acción metabólica de organismos microbianos los cuales generan combustibles líquidos y gaseosos. Así mismo BUN-CA (2002, pp. 11-43) presenta los siguientes procesos:

- *Digestión anaeróbica*

Es la digestión de biomasa con altos porcentajes de humedad con bacterias en ausencia de oxígeno controlado lo que resulta en la producción de biogás. Para lograr esto, la biomasa se dispone en un recipiente cerrado (digestor) y se debe dejar que la misma fermente, con el pasar del tiempo y en dependencia de la temperatura se producirá gas con una composición entre metano y dióxido de carbono.

- *Combustibles alcohólicos*

Mediante la fermentación de azúcares presentes en la biomasa se puede obtener etanol, también se puede generar metanol si a la madera se la somete a destilación destructiva.

- *Biodiesel*

Los principales componentes del biodiesel son ésteres alcalinos y ácidos grasos, de los cuales existe la posibilidad de obtener ciertos aceites vegetales, grasas animales y recicladas. Aquí ocurre la conocida “transesterificación” donde los aceites al mezclarse con etanol o metanol sufren una alteración química que da como productos ésteres grasos como el metilo éster o el etil.

- *Gas de rellenos sanitarios*

La fermentación de desechos sólidos urbanos genera un gas combustible cuya composición es metano y dióxido de carbono. En los rellenos sanitarios la fermentación de biomasa llega a ser un proceso natural del cual se produce gas que en muchas de las ocasiones no es aprovechado.

2.2.4. *Gasificación de la biomasa*

Se puede definir a la operación de gasificación de biomasa como un conjunto de ciertas reacciones termoquímicas en un ambiente deficiente de oxígeno el cual origina la conversión de un sólido en un conjunto de gases los cuales pueden ser usados en calderas para generar calor, en un motor de combustión interna o en una turbina de gas que generará electricidad. Además, a partir del gas obtenido se logra sintetizar productos inflamables líquidos que son de calidad alta a través del proceso conocido como Fischer-Tropsch (Nogués et al., 2010: pp. 21-43).

La principal ventaja de la gasificación radica en que se puede obtener un combustible que sin restricciones se puede alimentar a equipos de gas y/o gasóleo, teniendo así la oportunidad de sustituir a algunos combustibles fósiles de uso común.

Existe un sin número de definiciones de gasificación, pero todas coinciden en que prácticamente es la transformación de un material carbonoso en un gas que tiene un buen valor energético, el cual se obtiene por reacciones a temperatura elevada mediante agentes gasificantes, como el aire, oxígeno o vapor de agua. Por lo tanto, la gasificación es un proceso complejo que comprende gran cantidad de etapas termoquímicas (Nogués et al., 2010: pp. 21-43).

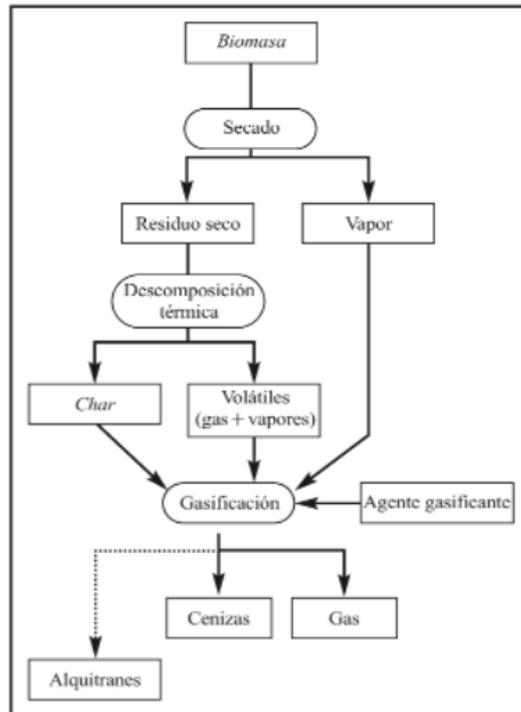


Ilustración 6-2: Esquema general del proceso de gasificación

Fuente: Nogués et al., 2010: 21-43.

2.2.5. Agentes gasificantes

Los autores Nogués et al. (2010, pp. 21-43) mencionan los siguientes agentes gasificantes que se pueden usar en un proceso de gasificación:

- Aire: la magnitud del aire depende del valor fijado por el estequiométrico que logra una combustión completa de la biomasa, ocasionando que el oxígeno del aire queme parte de biomasa y así aporta también energía necesaria al proceso. Cuando se gasifica con aire, el nitrógeno presente actúa como disolvente del gas que se produce y entonces tendrá un poder calorífico bajo ($<6\text{MJ/m}^3\text{N}$) y se denomina entonces “gas pobre”. Este gas se emplea generalmente como combustible en motores de combustión interna, turbinas a gas y calderos.
- Oxígeno: la calidad del gas será mayor puesto que no hay presencia de nitrógeno. El gas producido ahora se llamará gas de síntesis y suele tener un poder calorífico entre $10 - 12 \text{ MJ/m}^3\text{N}$. Las aplicaciones del gas son las mismas que el anterior, además, que se podría obtener metanol a partir del gas de síntesis.
- Vapor de agua: cuando se emplea este agente gasificante se da un proceso endotérmico en el que se obtiene gas con un poder calorífico medio de $10 - 12 \text{ MJ/m}^3\text{N}$, el cual además está enriquecido con monóxido de carbono e hidrógeno, razón por la cual el gas se podría usar para sintetizar compuestos como el amoníaco, metanol o gasolinas.

- Otros agentes gasificantes: la utilización de hidrogeno permite obtener un gas con propiedades muy variadas. El hidrogeno provoca que el gas tenga alta pureza en hidrogeno y metano, además posee alto poder calorífico y se podría usar como sustituto del gas natural.

2.2.6. Termoquímica del proceso de gasificación

2.2.6.1. Reacciones del proceso de gasificación

Durante un proceso de gasificación ocurren gran número de reacciones químicas. La composición final del gas depende básicamente de la composición elemental de la biomasa, el porcentaje de humedad, la temperatura a la que las reacciones ocurren, la relación aire/combustible, la densidad y el tamaño de la biomasa y el muy importante el tipo de gasificador. Generalmente el gas producido contiene los siguientes compuestos: monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO_2), hidrogeno (H_2), metano (CH_4), hidrocarburos pesados en pequeña medida, vapor de agua (H_2O), nitrógeno (N_2) y algunos compuestos indeseados como alquitranes y cenizas (Vargas, 2012, pp. 69-104). De estos, el CO , H_2 y CH_4 le otorgan el poder calorífico al gas. En la siguiente ilustración se muestra las reacciones que ocurren durante la gasificación de biomasa clasificadas según las reacciones con O, C, H_2O , CH_4 y reformado con vapor:

| Reacciones | R | Ecuación | Calor $\Delta H_{25^\circ C}$ kCal/mol | Reacción |
|----------------------------------------|-----------|-------------------------------------------------|-------------------------------------------|----------------------------------|
| Cambios de estado y pirólisis | Pirólisis | $Biomasa + calor \rightarrow char + liq + gas$ | | |
| | | $líquidos + calor \rightarrow gases$ | | |
| | | $Alquitrán(líquido) \rightarrow Alquitrán(gas)$ | | |
| con carbono | R1 | $C + CO_2 \leftrightarrow 2CO$ | 41,1 | Boudouard |
| | R2 | $C + H_2O \leftrightarrow CO + H_2$ | 31,3 | Gasificación con vapor. |
| | R3 | $C + 2H_2 \leftrightarrow CH_4$ | -17,9 | Metanización o Hidrogasificación |
| | R4 | $C + 1/2O_2 \rightarrow CO$ | -26,5 | Combustión parcial del C |
| con oxígeno (reacciones de combustión) | R5 | $C + O_2 \rightarrow CO_2$ | -94,5 | Combustión completa del C |
| | R6 | $CO + 1/2O_2 \leftrightarrow CO_2$ | -67,4 | Oxidación del CO |
| | R7 | $CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O$ | -191,8 | Comb. del CH ₄ |
| | R8 | $H_2 + 1/2O_2 \rightarrow H_2O$ | -57,8 | Oxidación del H ₂ |
| Shift | R9 | $CO + H_2O \leftrightarrow CO_2 + H_2$ | -9,8 | Shift (agua gas) |
| de metanización | R10 | $2CO + 2H_2 \rightarrow CH_4 + CO_2$ | -58,9 | |
| | R11 | $CO + 3H_2 \leftrightarrow CH_4 + 2H_2O$ | -49,2 | Metanización |
| | R14 | $CO_2 + 4H_2 \leftrightarrow CH_4 + 2H_2O$ | -39,4 | |
| Reformado con vapor | R12 | $CH_4 + H_2O \leftrightarrow CO + 3H_2$ | 48,5 | Gasificación del metano |
| | R13 | $CH_4 + 1/2H_2O \rightarrow CO + 2H_2$ | -8,6 | Gasificación del metano |
| | R14Rev | $CH_4 + 2H_2O \leftrightarrow CO_2 + 4H_2$ | 39,6 | |
| con otros hidrocarburos | R15 | $C_2H_4 + 3O_2 \rightarrow 2CO_2 + 2H_2O$ | -317,2 | |
| | R16 | $C_nH_{2n} + H_2 \rightarrow C_nH_{2n+2}$ | | |
| | R17 | $C_nH_m + nH_2O \rightarrow nCO + (n + m/2)H_2$ | | |
| Otras reacciones con carbono y agua | R18 | $C + 2H_2O \rightarrow CO_2 + 2H_2$ | | |
| | R19 | $2C + 2H_2O \rightarrow H_2O + CH_4$ | | |

Ilustración 7-2: Clasificación de las principales reacciones en un proceso de gasificación (reacción exotérmica, reacción endotérmica)

Fuente: Vargas, 2012, pp. 69-104.

2.2.7. Etapas del proceso de gasificación

Se tiene las siguientes etapas en orden: secado, pirólisis, oxidación o combustión y reducción. A continuación, se muestra las reacciones químicas que ocurre en cada etapa:

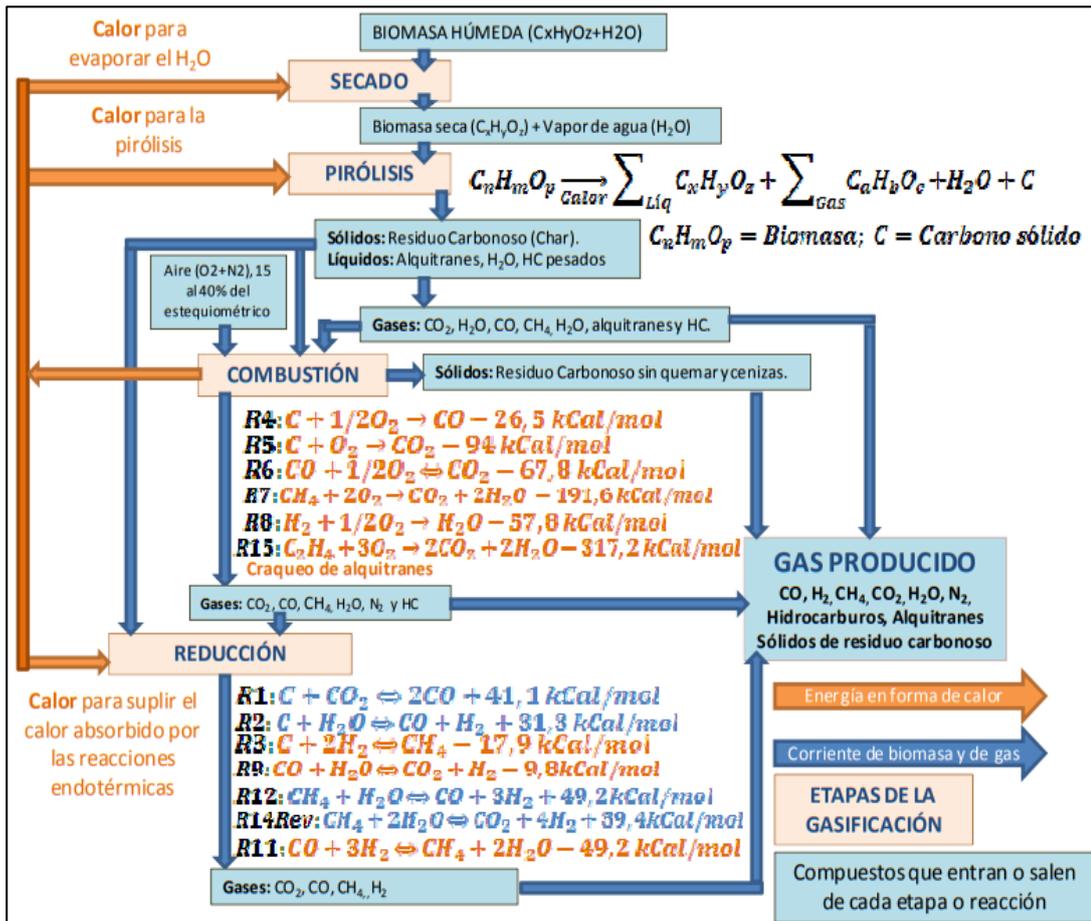


Ilustración 8-2: Entradas, salidas y reacciones de las etapas del proceso de gasificación (reacción exotérmica, reacción endotérmica)

Fuente: Vargas, 2012, pp. 69-104.

2.2.7.1. Secado

El calor que se produce por las reacciones de combustión hacen que la humedad de la biomasa se evapore. La humedad entre el 7 y el 25% asegura que se produzca un gas con valor calorífico relativamente bueno. El agua que está en la superficie de la biomasa por encima de 100 °C se evapora totalmente, si la temperatura sube aún más los componentes volátiles de bajo peso molecular comienzan a volatilizarse hasta que la temperatura llegue a 300 °C aproximadamente. Si la humedad es elevada, se debe presecar para eliminar la humedad que sea posible (Vargas, 2012, pp. 69-104).

2.2.7.2. Pirolisis

Es una descomposición térmica a elevada temperatura que se da entre los 300 y 600 °C. En esta etapa los gases combustibles volátiles se desprenden, como es un ambiente deficiente de oxígeno

algunos no logran quemarse y se transforman en alquitranes. Se produce también char que es un residuo sólido carbonoso o conocido también como carbón vegetal. Gases como: H₂O en forma de vapor, CO₂, H₂, CO e hidrocarburos (benceno en ciertas ocasiones) son los que se producen en la pirolisis (Vargas, 2012, pp. 69-104).

La pirolisis ocurre más rápido que la gasificación por lo que la producción de gases mejora cuando hay mayor tiempo de permanencia y la temperatura es la adecuada. En esta etapa también se forman los alquitranes líquidos por condensación de gases condensables. Los alquitranes son compuestos no deseables en el gas y por eso se deben someter a un tratamiento térmico para craquearlos o eliminarlos del gas al final de la gasificación (Vargas, 2012, pp. 69-104).

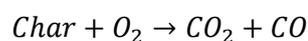
2.2.7.3. Oxidación o combustión

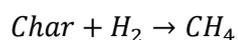
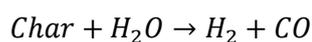
En esta etapa, el agente gasificante reacciona con el char, si se considera aire ($R5, C + O_2 \rightarrow CO_2$) se produce dióxido de carbono y se mantiene la temperatura entre 600°C y 1200°C. Puesto que el aire inyectado es menor que el estequiométrico necesario para una combustión completa (oxígeno reactivo limitante), ocurre una combustión incompleta ($R4, C + O \rightarrow CO$), parte del CO se mezcla con O₂ ocurriendo otra reacción de combustión ($R6, CO + 1/2 O_2 \rightarrow CO_2$). Las reacciones antes mencionadas son exotérmicas y principalmente se produce CO y CO₂, el resto del oxígeno se mezcla con CH₄ y H₂ que son producto de la pirolisis ($R7, CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O$ y $R8, H_2 + 1/2 O_2 \rightarrow H_2O$). Esta etapa se genera el calor que necesitan las demás reacciones (endotérmicas) para que ocurran, como la pirolisis y el secado, también suministra calor a las reacciones endotérmicas puesto que las reacciones R5 y R4 (ver ilustración 3-2) son las que mayor cantidad de calor desprenden (Vargas, 2012, pp. 69-104).

El exceso de agente gasificante aumentara desfavorablemente la temperatura del gasificador generando pérdidas, las cuales afectan directamente la calidad del gas producido y la eficiencia del equipo.

2.2.7.4. Reducción – gasificación del residuo carbonoso

En la etapa de reducción reaccionan H₂O, CO₂, O₂ y H₂ con los gases que fueron generados por pirolisis. Las reacciones del residuo carbonoso son las más destacables. La reducción del residuo carbonoso (char) ocurre según las reacciones que Vargas (2012, pp. 69-104) muestra con diferentes agentes gasificantes:





Cuando el residuo carbonoso reacciona con agentes gasificantes genera gases cuyo peso molecular es bajo, un ejemplo es: CO, CH₄ y CO₂. Debido a que la biomasa tiene cierto porcentaje de humedad, se genera hidrógeno por medio de la reacción entre el agua y carbón. Principalmente el carbón reacciona endotérmicamente con CO₂ o vapor de agua (R1 y R2) aunque también se llevan a cabo algunas reacciones exotérmicas (R3, R4 y R5) (ver ilustración 3-2) (Vargas, 2012, pp. 69-104).

2.2.8. Tipos de gasificadores

Los equipos de gasificación se dividen en 3 tipos: lecho móvil, lecho fluidizado y de flujo de arrastre. Esta división se realiza conforme a una gama de capacidades operativas de funcionamiento correspondientes a cada tipo de gasificador. Los gasificadores de lecho móvil o también conocidos como lecho fijo son equipos utilizados para plantas pequeña escala, dentro de este tipo encontramos los Dwindraft que tienen rangos de producción de energía de 1KW a 1MW y los Updraft de 1MW a 10 MW. Los de lecho Fluidizado es apropiado para plantas intermedias (1MW – 100MW) y los reactores de flujo por arrastre para unidades de gran capacidad (>50MW) (Vargas, 2012, p. 273).

2.2.8.1. Lecho móvil en contracorriente o updraft

Para este tipo de gasificador se presentan dos corrientes de alimentación contrapuestas entre sí, la primera es la corriente de alimentación sólida de biomasa que ingresa por la parte superior del equipo y va cayendo dentro del mismo, la segunda es la corriente gaseosa originada de las etapas de pirólisis y reducción, estas corrientes gaseosas están a altas temperaturas lo que hace que la biomasa se vaya secando a medida que desciende en el equipo para después efectuarse un proceso de pirólisis. Los gases producidos tienden a ascender en el interior del equipo y por otro lado el char generado va descendiendo, interactuando con los gases generados en el proceso de combustión de biomasa, donde también se reducen otros componentes como el agente gasificante y el gas, en la zona central del proceso de reducción. Como el agente gasificante se encuentra en la zona inferior, a medida que descienda la biomasa se producen reacciones de oxidación o combustión, lo que genera gran cantidad de calor que eleva la temperatura en estas zonas del equipo (Nogués et al., 2010, pp. 287-302).

La temperatura del gas producido será de 70 a 300 °C, los alquitranes estarán presentes en el gas como aerosoles. Esto no es problema cuando el gas se usa para producir calor, si el gas se va a usar en turbinas y/o motores es muy necesario elaborar algún sistema de limpieza del mismo. Las principales ventajas de un gasificador updraft son su relativa sencillez de construcción y operación y su elevada eficacia térmica (Nogués et al., 2010, pp. 287-302).

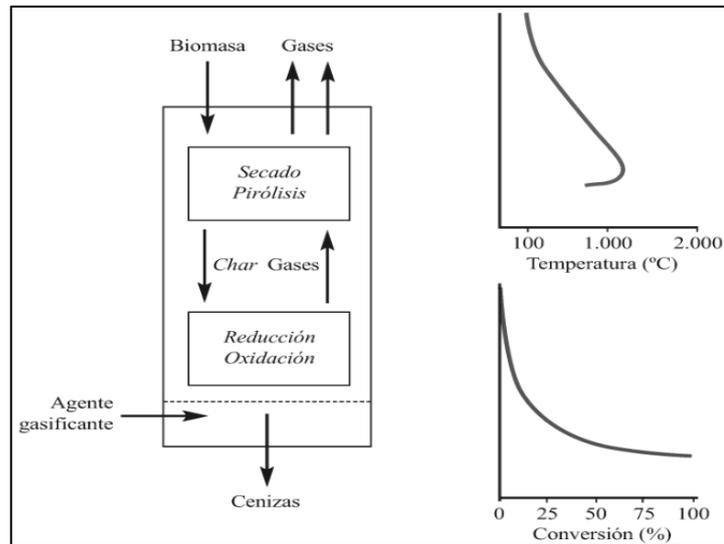


Ilustración 9-2: Flujo de materia y perfiles de temperatura y conversión en un reactor updraft

Fuente: Nogués et al., 2010, pp. 287-302.

2.2.8.2. Lecho móvil en corrientes paralelas o downdraft

En este caso el gas y la biomasa toman el mismo sentido, normalmente descendente. El sólido que ingresa por arriba sufre la etapa de secado y pirólisis, cuando sigue descendiendo por el reactor hacia las temperaturas más elevadas. El incremento de la temperatura se da porque la combustión está ocurriendo en la parte inferior y desprende calor. De los char de la etapa de combustión, una parte no se quema y va descendiendo hacia la etapa de reducción donde reacciona con productos de la combustión. Los gases generados se expulsan por la parte inferior del gasificador (Nogués et al., 2010, pp. 287-302).

Este gasificador otorga la posibilidad de obtener un bajo contenido de alquitranes. Esto porque los alquitranes (producto del pirólisis) son obligados a pasar por una zona de elevada temperatura (la de oxidación) en la que se craquean, reduciendo su fracción en el gas generado, este tipo de gasificadores permite gasificar biomazas con bajo contenido de humedad (< 25% de humedad), trituradas o peletizadas, con dimensiones de 1 a 10 cm y un bajo contenido en cenizas (< 1% en peso) (Nogués et al., 2010, pp. 287-302).

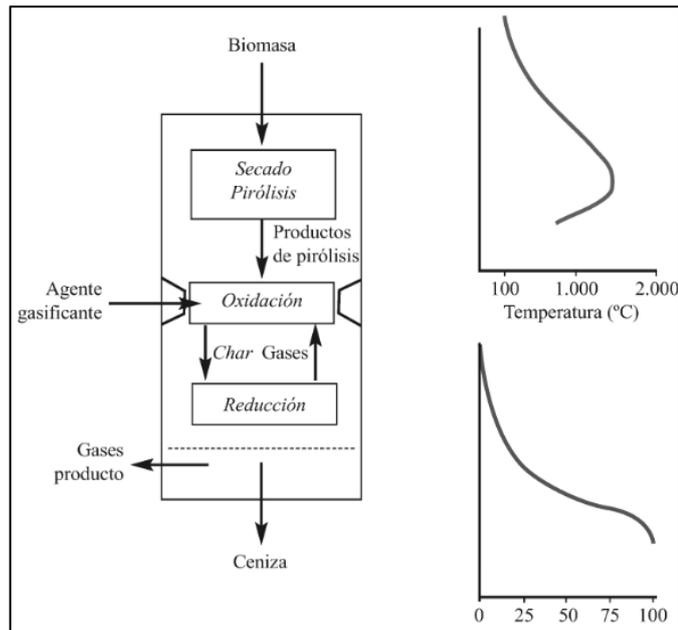


Ilustración 10-2: Flujo de materia y perfiles de temperatura y conversión en un reactor downdraft

Fuente: Nogués et al., 2010, pp. 287-302.

A su vez, Food and Agriculture Organisation (FAO, 1986, p. 56) menciona que los gasificadores downdraft se clasifican según su garganta y por su entrada de aire en:

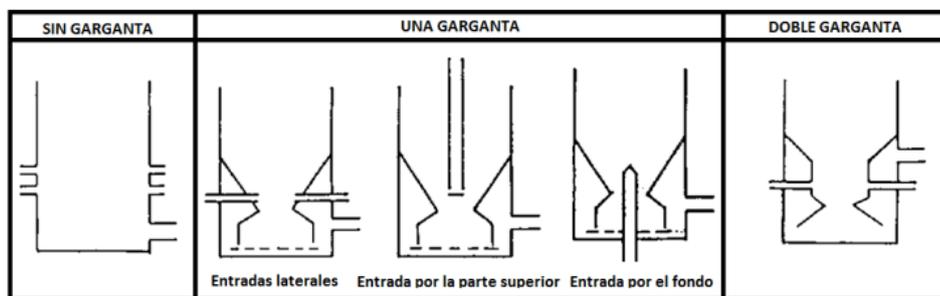


Ilustración 11-2: Tipos de gasificadores downdraft

Fuente: FAO, 1986, p. 56.

2.2.8.3. De lecho fluidizado

En este tipo de gasificadores no hay zonas específicas para cada etapa, el secado, la pirólisis, la oxidación y la reducción se dan simultáneamente en cualquier punto del reactor. Cuando la biomasa se carga en el reactor simultáneamente estos procesos ocurren generando una coexistencia de los productos de pirólisis, oxidación y reducción en el reactor. Esto genera que la temperatura sea la misma en todo el reactor. En este tipo de gasificadores el gas producido tiene

con cantidades elevadas de partículas y cenizas, a una temperatura entre 800 y 1.000 °C (Nogués et al., 2010, pp. 287-302).

Cuando el agente gasificante es aire, se produce un gas con contenido de alquitranes medio en comparación con los que se obtienen en gasificadores updraft y downdraft. Las partículas de cenizas que no reacciona son transportadas fuera del reactor, y usualmente se separan mediante ciclones. Para este gasificador, la generación de partículas es mayores que para los de lechos móviles. Los reactores de lecho fluidizado también pueden ser de lecho burbujeante o circulante (Nogués et al., 2010, pp. 287-302).

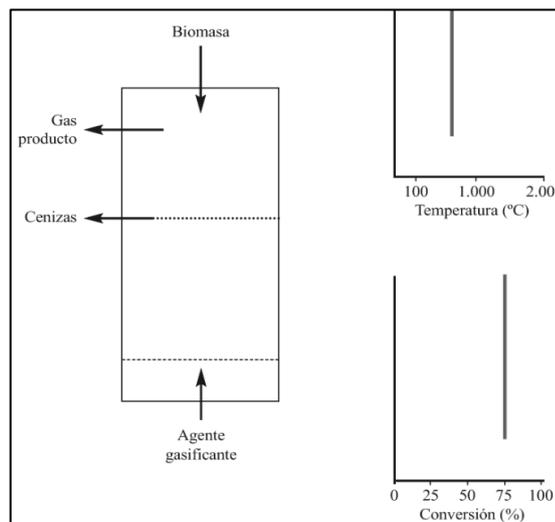


Ilustración 12-2: Flujo de materia y perfiles de temperatura en un reactor de lecho fluidizado

Fuente: Nogués et al., 2010, pp. 287-302.

2.2.8.4. De lecho arrastrado

La alimentación en este tipo de gasificador tiene que ser equitativamente dividida. La temperatura de operación suele ser de 1.200 °C o mayores. Las presiones de operación superan los 20 bar. El gas que se genera tiene un bajo nivel de alquitranes, por su elevada temperatura de operación es un problema al momento de seleccionar materiales para su construcción y también se puede dar la fusión de las cenizas (Nogués et al., 2010, pp. 287-302).

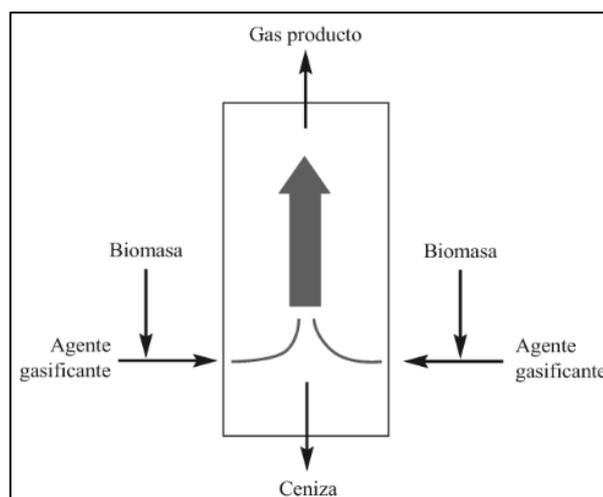


Ilustración 13-2: Flujo de materia en un reactor de lecho arrastrado

Fuente: Nogués et al., 2010, pp. 287-302.

2.2.9. Comparación entre los gasificadores:

Las especificaciones de operación están definidas en función del tipo de gasificador con el que estemos tratando, estas características de operación son diferentes en función del tipo de gasificador empleado. A continuación, se presenta una tabla comparativa de las características de operación para cada tipo de gasificador.

Tabla 3-2: Criterios de comparación entre gasificadores

| Criterios | Lecho móvil updraft-contracorriente | Lecho móvil down draft | Lecho arrastrado | Lecho fluidizado |
|----------------------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------------------------------|-----------------------------|------------------------------------------|
| Madurez tecnológica | Reactor sencillo | Tecnología simple y probada | Tecnología sencilla | Tecnología reciente, compleja |
| Humedad máxima de la biomasa | 60% | 25% | Baja humedad | Admite una alta variación en la humedad. |
| Contaminación ambiental, Limpieza del gas generado | Alta cantidad de cenizas y alquitrán | Bajos contenidos de alquitranes, cenizas y residuo carbonoso | Poco contenido de alquitrán | Niveles moderados de alquitrán generado |
| Eficiencia de la combustión o rendimiento | Alta | Alta | Baja | Alta |
| Costo de inversión en equipos | Altos | Bajo | Bajo | Altos |
| Potencias admisibles | Hasta 10MW | Hasta 1MW | De 10 a 100KW | De 2 a 50MW |

| | | | | |
|------|-------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|
| Usos | Indicados para aplicaciones del gas en generadores de calor | Utilizados para el uso en motores de combustión interna a pequeña escala. Para la generación de electricidad a pequeña escala (<1MW) | Aplicación en regiones apartadas de 10 a 100KW | Generación a gran escala, generalmente para capacidades superiores a 100KW |
|------|-------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|

Realizado por: Noteno, F.; Zapata, S., 2022.

2.2.10. Variables de diseño de gasificadores

Respecto a las variables de diseño, el autor Ramírez (2011, p. 143) menciona las siguientes:

- Temperatura: la gasificación ocurre a elevada temperatura con un agente gasificante y dicha temperatura debe ser constante hasta que la biomasa se transforme solo en cenizas o residuos. Cuando se alcanzan temperaturas de 800 a 900 °C la difusión de los poros y su transferencia de masa es más rápida lo que aumenta la velocidad de reacción. La temperatura es, además, el parámetro que define las zonas de secado (100 – 300 °C), pirólisis (entre 300 - 600 °C), combustión (entre 600 - 1.200 °C) y reducción (entre 500 - 900 °C) en un proceso de gasificación.
- Tiempo de permanencia: cuando este es mayor la biomasa reacciona con el agente gasificante y por la temperatura elevada, disminuye la cantidad de material de residuos carbonosos generados y se incrementa así la producción de gases obtenidos.
- Agente oxidante: se puede utilizar el aire, el oxígeno, el dióxido de carbono, vapor de agua o una mezcla de estos, sin embargo, cada uno tiene distintas características de reacción en función del tipo de gas se quiera obtener.

Por otro lado, los autores Nogués et al. (2010, p. 223) destacan los siguientes:

- Presión: cuando la presión aumenta se favorece a la formación de hidrocarburos y alquitranes. Los gasificadores de lecho móvil tienen presiones de operación de aproximadamente 1 atm, mientras los de lecho fluidizado se pueden alcanzar 30 bar en algunos casos.
- Geometría: La capacidad de procesamiento está en función del tamaño del equipo de gasificación. Es importante también considerar el volumen de la zona de reducción para que el contacto gas-sólido sea el necesario y se den las reacciones de reducción, obteniendo así un rendimiento máximo del proceso. Una buena geometría permite que el agente gasificante llegue a todas partes del reactor y se evite generar zonas muertas. Para el gasificador de lecho móvil de corrientes paralelas (downdraft) debe existir una buena distribución del agente

gasificante en la zona de oxidación, para que ningún producto del pirólisis deje de pasar por esta zona, pues su ventaja principal en este tipo de gasificador es que los productos indeseables en el gas se quemen en la zona de combustión.

CAPÍTULO III

3. MARCO METODOLÓGICO

3.1. Caracterización de la biomasa

La biomasa que se decidió analizar para el dimensionamiento del gasificador es madera de eucalipto, por lo que a continuación se mencionan las pruebas de laboratorio realizadas a la misma con el fin de caracterizarla.

3.1.1. Variables físicas

3.1.1.1. Densidad

Definida como la cantidad de masa por unidad de volumen, esta propiedad física de la biomasa es muy importante considerarla en la gasificación, debido a que la biomasa residual sólida forestal con mayor densidad beneficia la relación entre energía por unidad de volumen (Barajas, 2013, p. 32). Entre los beneficios de aumentar la densidad de la biomasa se puede mencionar que facilita el almacenamiento, manipulación, transporte y también favorece la disminución de contenido de humedad.

Para realizar esta prueba se eligieron 3 muestras pequeñas de la biomasa usada en el proceso de gasificación y se determinó la masa de cada uno, para luego colocar en una probeta un volumen conocido de agua y después depositar la muestra de biomasa en la probeta para determinar el volumen de agua que desplazó el sólido. Para determinar la densidad se hace uso de la siguiente fórmula:

$$\rho = \frac{\text{masa}}{\text{volumen}}$$

Tabla 1-3: Datos densidad de la madera

| PRUEBAS | Repetición 1 | Repetición 2 | Repetición 3 |
|----------------------------|--------------|--------------|--------------|
| Masa (g) | 7,5396 | 4,3591 | 7,426 |
| Volumen (cm ³) | 11,500 | 8,500 | 13,00 |
| Densidad | 0,656 | 0,512 | 0,571 |

Realizado por: Noteno, F.; Zapata, S. 2022.

Se determina que la densidad promedio de las astillas de madera usadas en el proceso de gasificación de biomasa es de 0,579 g/cm³.

La densidad del eucalipto debe ser entre $0,5 \text{ g/cm}^3$ y $0,75 \text{ g/cm}^3$, lo que las clasifica en el grupo de las maderas semipesados (Juela, 2015, p. 6).

3.1.1.2. Humedad

Para la determinación de humedad se seleccionó muestras de madera empleadas en la gasificación y se los colocó en una termobalanza de la marca RADWAG a 105°C para la determinación de la humedad de la biomasa. Mediante el uso de este equipo se determinó que la humedad es de 11,66%. Para el proceso de gasificación es fundamental que la biomasa tenga un contenido de humedad menor al 30% debido a que el exceso de humedad reduce el poder calorífico y la cantidad de gases combustibles del proceso (Barajas, 2013, pp.38). En caso de que la humedad sea mayor se debe iniciar con operaciones de secado que permitan acondicionar la biomasa para la gasificación.



Ilustración 1-3: Termobalanza RADWAG

Realizado por: Noteno, F; Zapata, S., 2022.

3.1.2. Variables químicas

3.1.2.1. Cenizas

Las cenizas son el resultado sólido de la etapa de combustión en el proceso de gasificación, es importante conocer la cantidad de residuo no combustible que se genera, para de esa forma dimensionar con una mejor visión el depósito de cenizas apropiado para la cantidad de biomasa empleada en el equipo de gasificación.

Para la determinación de cenizas se empleó la norma ASTM D1102-84, para lo cual se utilizó muestras de madera empleadas en el proceso de gasificación.

Tabla 2-3: Mediciones y simbología.

| Medición | Símbolo |
|------------------------------------|---------|
| Peso de ceniza | W1 |
| Peso de la muestra secada al horno | W2 |

Realizado por: Noteno, F; Zapata, S., 2022.

Tabla 3-3: Resultados de laboratorio

| Repeticiones | Mediciones | |
|--------------|------------|-------|
| | W1 | W2 |
| 1 | 0,004 | 2,009 |
| 2 | 0,004 | 2,004 |
| 3 | 0,005 | 2,005 |

Realizado por: Noteno, F; Zapata, S., 2022.

$$\text{Cenizas \%} = (W1/W2) \times 100$$

- Prueba 1:

$$\text{Cenizas \%} = \left[\frac{0,004}{2,009} \right] \times 100 = 0,199\%$$

- Prueba 2:

$$\text{Cenizas \%} = \left[\frac{0,004}{2,004} \right] \times 100 = 0,199\%$$

- Prueba 3:

$$\text{Cenizas \%} = \left[\frac{0,005}{2,005} \right] \times 100 = 0,249\%$$

Se determina que el promedio de las tres mediciones de cenizas es de: 0,216%. Este valor pertenece al rango de densidad de biomasa usada en los procesos de gasificación de tipo Dwindraft, debido a que el porcentaje de cenizas aceptables para la biomasa es de entre 0% a 15% (Vargas, 2012, p. 23).

3.1.2.2. Material volátil

Se define como el porcentaje de material que combustionará con mayor facilidad en el proceso de gasificación, también es conocida como el porcentaje en gases liberados por una sustancia

carbonosa mediante una descomposición térmica. Estos gases están constituidos de elementos como el carbono, hidrógeno, agua, entre otros (Barajas, 2013, p. 39).

Para la determinación de material volátil de la madera de eucalipto se utilizó la norma: ASTM D1762-84 es el método de prueba estándar que faculta analizar químicamente a la biomasa.

Tabla 4-3: Mediciones y simbología

| Medición | Símbolo |
|---------------------------------------------------------|---------|
| Gramos de muestra seca al aire | A |
| Gramos de muestra después del secado a 105°C | B |
| Gramos de muestra después del secado a 950°C | C |
| Gramos de residuo después de pasar por la mufla a 750°C | D |

Realizado por: Noteno, F; Zapata, S., 2022.

Tabla 5-3: Resultados de laboratorio

| Repeticiones | Mediciones | | | |
|--------------|------------|------|-------|-------|
| | A | B | C | D |
| 1 | 1,001 | 0,65 | 0,077 | 0,002 |
| 2 | 1,001 | 0,66 | 0,107 | 0,003 |
| 3 | 1,001 | 0,66 | 0,082 | 0,002 |

Realizado por: Noteno, F; Zapata, S., 2022.

$$\text{Material volátil \%} = [(B - C)/B] \times 100$$

- Prueba 1:

$$\text{Material volátil \%} = \left[\frac{0,65 - 0,077}{0,65} \right] \times 100 = 88,15\%$$

- Prueba 2:

$$\text{Material volátil \%} = \left[\frac{0,66 - 0,107}{0,66} \right] \times 100 = 83,78\%$$

- Prueba 3:

$$\text{Material volátil \%} = \left[\frac{0,66 - 0,082}{0,66} \right] \times 100 = 87,57\%$$

Estableciendo el promedio de las mediciones efectuadas se determina que la madera de eucalipto tiene un: 86,5% de material volátil.

3.1.2.3. Carbón fijo

Se define como la fracción sólida que queda después de eliminar la ceniza, material volátil y la humedad de la biomasa. Es importante considerar que el carbón fijo en conjunto con el material volátil dictamina la fluidez con la cual la biomasa combustiona y se gasifica (Barajas, 2013, p. 40).

Para la determinación del carbón fijo se han seguido los pasos establecidos en la normativa: ASTM D1762-84. Por lo tanto, se usan los datos utilizados en la tabla anterior.

$$\text{Carbón fijo \%} = [D/B] \times 100$$

- Prueba 1:

$$\text{Carbón fijo \%} = \left[\frac{0,002}{0,65} \right] \times 100 = 0,308\%$$

- Prueba 2:

$$\text{Carbón fijo \%} = \left[\frac{0,003}{0,66} \right] \times 100 = 0,455\%$$

- Prueba 3:

$$\text{Carbón fijo \%} = \left[\frac{0,002}{0,66} \right] \times 100 = 0,303\%$$

Estableciendo el promedio de las 3 repeticiones de la madera de eucalipto se obtiene que el porcentaje de carbón fijo de la biomasa es de 0,36%

3.1.2.4. Capacidad calorífica de la biomasa

Para la determinación de la capacidad calorífica del material se usó un calorímetro, donde primero se determinó la constante calorimétrica del equipo (C) para después determinar la capacidad calorífica de la madera de eucalipto.

Tabla 6-3: Resultados capacidad calorífica de la madera

| N° | Constante calorimétrica (J/°C) | Promedio | N° | Capacidad calorífica, Cp (J/g °C) | Promedio Cp |
|----------|--------------------------------|------------|----------|-----------------------------------|--------------|
| Prueba 1 | 82,632 | 85,111 J/C | Prueba 1 | 11,574 | 10,510 J/g C |
| Prueba 2 | 87,589 | | Prueba 2 | 13,067 | |
| | | | Prueba 3 | 6,891 | |

Realizado por: Noteno, F; Zapata, S., 2022.

3.1.2.5. Composición elemental de la biomasa

Es importante conocer cuál es la disposición elemental de la biomasa a usarse en el proceso de gasificación, puesto que a partir de estos valores se debe calcular la fórmula empírica de la biomasa para posteriormente calcular la relación aire/combustible que define la cantidad de aire necesario para combustionar 1kg de combustible, en este caso biomasa. Obteniéndose así los siguientes datos:

Tabla 7-3: Composiciones elemental madera de eucalipto

| Muestras estándar | Elemento (%) | | | |
|-------------------|--------------|--------------|-------------|--------------|
| | N | C | H | O |
| Estándar | 17,01 | 42,30 | 4,43 | 36,26 |
| Prueba 1 | 1,28 | 46,55 | 5,46 | 46,71 |
| Prueba 2 | 1,17 | 45,48 | 5,88 | 47,47 |
| Prueba 3 | 1,16 | 47,09 | 6,02 | 45,73 |
| PROMEDIO | 1,20 | 46,37 | 5,79 | 46,64 |

Realizado por: Noteno, F; Zapata, S., 2022.

3.2. Ingeniería del proyecto

3.2.1. Resultados de la caracterización de la biomasa

A continuación, se recopila todos los resultados de la caracterización de la biomasa en la siguiente tabla.

Tabla 8-3: Resultados de la caracterización de la biomasa

| N° | COMPONENTE | UNIDAD | VALOR PROMEDIO | MÉTODO |
|----|------------------|-------------------|----------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1 | Densidad | g/cm ³ | 0,579 | Método de Arquímedes (se usó agua como fluido asumiendo una densidad de 1 g/cm ³) |
| 2 | Humedad | % Peso | 11,66 | Termobalanza RADWAG |
| 3 | Ceniza | % Peso | 0,216 | ASTM D1102-84 |
| 4 | Material volátil | % Peso | 86,5 | ASTM D1762-84 |
| 5 | Carbón fijo | % Peso | 0,36 | ASTM D1762-84 |

Realizado por: Noteno, F; Zapata, S., 2022.

3.2.2. Selección del tipo de gasificador a construir

Entre los diferentes tipos de gasificadores de biomasa ya sea de lecho fijo, lecho fluidizado y flujo por arrastre se ha decidido construir un gasificador de lecho fijo, debido a que el equipo está destinado para realizar pruebas a pequeña escala sin la necesidad de generar grandes cantidades de energía superiores a 10MWth.

Para seleccionar el tipo de gasificador apropiado entre los gasificadores de lecho fijo se considerarán diferentes criterios en función a la construcción, funcionalidad y requerimientos del equipo, para esto se asignará un puntaje a cada uno de los criterios en relación al tipo de gasificador que corresponda, la puntuación se asigna conforme lo mencionado en el punto 2.2.8 y la tabla 3-2, el puntaje asignado corresponderá en una escala de alto, medio y bajo, asignando un valor de alto de 3 puntos, medio de 2 puntos y bajo 1 punto. La tabla se fundamenta:

Tabla 9-3: Selección del tipo de gasificador

| CRITERIOS | GASIFICADOR | | |
|-----------------------|-------------|-----------|------------|
| | Downdraft | Updraft | Crossdraft |
| Potencia | 3 | 2 | 3 |
| Eficiencia | 3 | 3 | 2 |
| Fabricación y montaje | 2 | 2 | 2 |
| Mantenimiento | 2 | 2 | 2 |
| Operatividad | 3 | 3 | 3 |
| Aplicaciones | 3 | 2 | 2 |
| Seguridad | 3 | 2 | 2 |
| Costo | 2 | 2 | 2 |
| Transporte | 2 | 2 | 2 |
| Combustible | 2 | 3 | 2 |
| TOTAL | 25 | 23 | 22 |

Realizado por: Noteno, F; Zapata, S., 2022.

Bajo este método de selección se ha determinado que el gasificador de biomasa apropiado a construir es de tiro invertido o downdraft. Las ventajas de este tipo de gasificador son: las bajas pérdidas de presión, alta eficiencia térmica, baja formación de escorias, bajas temperaturas de salida del gas, pero su principal ventaja radica en la practicidad de producir gas de síntesis con bajo porcentaje de alquitrán lo que lo hace ideal para el funcionamiento de motores (Sánchez, 2015, p. 139).

De acuerdo con Blanco (2021, p. 620) el tipo de gasificador de biomasa para residuos agrícolas más apropiado es el de lecho móvil de tipo downdraft, gracias a que su funcionalidad es poco compleja

pero no deja de ser práctica y eficiente, además que tiene bajos niveles de emisión de contaminantes en relación a los otros tipos de gasificadores, bajos costos de inversión, además que posee alta eficiencia en la conversión energética, misma que puede ser aprovechada para el encendido de motores de combustión interna y adaptarse a generadores eléctricos.

3.2.3. Cálculos para el diseño del gasificador

Gracias al criterio de selección se determinó que el gasificador a construir será de tiro invertido o downdraft. Dentro de los tipos de gasificadores downdraft se eligió diseñar un gasificador de una garganta y la entrada de aire a la cámara de combustión será por la parte superior y de forma central. A continuación, se representa la forma general el diseño a construir:

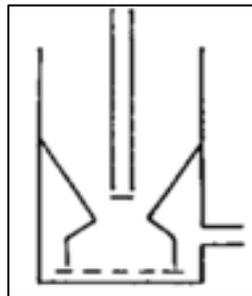


Ilustración 2-3: Gasificador a construir

Fuente: FAO, 1986, p. 56.

Se consideraron otros aspectos como: facilidad y tiempo de construcción, disponibilidad económica en base al tamaño del equipo y el requerimiento de los materiales óptimos para su fabricación y una producción de gas suficiente para alimentar un motor en caso de que se requieran hacer pruebas a largo plazo.

Las características principales del gasificador son:

1. Entrada central de aire ubicada en la parte superior del equipo, donde la tubería utilizada tiene libertad de movimiento de forma vertical con el fin de manipular la distancia entre la garganta del gasificador y el final de la tubería de entrada de aire.
2. La cámara de combustión y reducción, así como el cilindro que las contiene está construida con acero A-36 con un espesor de 4mm.
3. Entre el cilindro y las cámaras de combustión y reducción se colocó material refractario.
4. La parrilla de la cámara de reducción tiene facilidad de movimiento de forma vertical con el fin de variar la altura de la cámara.
5. La compuerta de alimentación de biomasa y la compuerta de retiro de cenizas están construidas con un sistema de bridas que impiden las fugas de gas.

3.2.3.1. Principales dimensiones de gasificadores para astillas de madera

En la siguiente tabla se muestran algunas dimensiones de gasificadores para astillas de madera.

Tabla 10-3: Dimensiones principales de gasificadores para astillas de madera

| Tipo de gasificador | Principales dimensiones del corazón y la zona de reducción (mm) | | | | | | | Producción del gas (m ³ /h) | | Consumo de biomasa en carga máxima (kg/h) |
|---------------------|-----------------------------------------------------------------|-----|-----|-----|----|------|----|----------------------------------------|-----|-------------------------------------------|
| | Dh | dt | Hnt | hr | Nt | dn | Ln | Max | Min | |
| F-3 | 310 | 60 | 115 | 175 | 6 | 7,0 | 50 | 25 | 4 | 12 |
| 60-120 | 310 | 80 | 125 | 165 | 6 | 8,0 | 50 | 50 | 6 | 25 |
| F-300 | 310 | 100 | 135 | 155 | 6 | 9,5 | 40 | 80 | 8 | 35 |
| 60/120 | 310 | 120 | 145 | 145 | 6 | 11,5 | 40 | 115 | 12 | 50 |
| F-5 | 370 | 80 | 125 | 205 | 7 | 9,0 | 60 | 60 | 7 | 25 |
| 80-150 | 370 | 100 | 135 | 195 | 7 | 10,0 | 60 | 80 | 10 | 35 |
| F-500 | 370 | 125 | 145 | 185 | 7 | 11,0 | 50 | 120 | 13 | 55 |
| 80/150 | 370 | 150 | 155 | 175 | 7 | 12,0 | 50 | 165 | 18 | 75 |
| F-7 | 430 | 110 | 140 | 275 | 9 | 9,5 | 70 | 105 | 13 | 50 |
| 110-180 | 430 | 130 | 150 | 265 | 9 | 10,5 | 70 | 135 | 17 | 60 |
| F-700 | 430 | 155 | 160 | 255 | 9 | 12,0 | 50 | 170 | 22 | 80 |
| 110/180 | 430 | 180 | 170 | 245 | 9 | 14,0 | 50 | 220 | 28 | 100 |

Fuente: FAO, 1986, p. 53.

Realizado por: Noteno, F; Zapata, S., 2022.

Para iniciar la construcción de la cámara combustión y reducción se definieron algunos requerimientos del equipo, como por ejemplo se estableció un consumo de 25 Kg/h de biomasa en proceso batch o por lotes, una capacidad de producción de gas pobre entre 7 y 60 m³/h y la facilidad de construcción al ser dimensiones que se encuentran en la media de todas las mostradas en la tabla. En base a estos puntos el tipo de gasificador seleccionado es el F-5 con las dimensiones de cámara de combustión y reducción que se encuentran establecidos así:

Tabla 11-3: Dimensiones principales del tipo de gasificador elegido

| Tipo de gasificador | Principales dimensiones del corazón y la zona de reducción (mm) | | | | | | | Producción del gas (m ³ /h) | | Consumo de biomasa en carga máxima (kg/h) |
|---------------------|-----------------------------------------------------------------|----|-----|-----|---|-----|----|----------------------------------------|-----|-------------------------------------------|
| | Dh | dt | Hnt | hr | N | Dn | Ln | Max | Min | |
| F-5 | 370 | 80 | 125 | 205 | 7 | 9,0 | 60 | 60 | 7 | 25 |

Fuente: FAO, 1986, p. 53.

Realizado por: Noteno, F; Zapata, S., 2022.

Además, la cámara de combustión debe tener una inclinación entre 45° y 60° con el fin de que la biomasa fluya mejor hacia la garganta y se eviten atascamiento de esta (FAO, 1986, p. 38). Razón por la que al ángulo de inclinación de la cámara de combustión es de 60°.

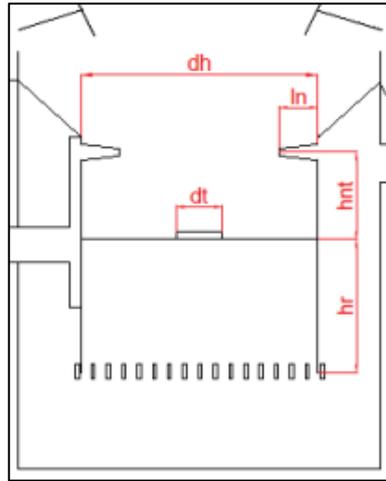


Ilustración 3-3: Dimensiones zona de combustión y reducción

Fuente: FAO, 1986, p. 54.

Donde:

Dh = diámetro de la cámara de combustión

dt = diámetro de la garganta

Hnt = altura de las toberas que inyectan aire al gasificador

hr = altura de la cámara de reducción

Nt = número de toberas

dn = diámetro de una sola tobera

Ln = longitud de penetración de las toberas de inyección de aire en el gasificador (no aplicada para una entrada central de aire)

3.2.3.2. Altura cámara de residuos

Es necesario conocer primero la cantidad de residuos que se generan por la gasificación de biomasa, por lo que se determinó mediante experimentación que de 5 Kg de biomasa se generan 0,241 Kg de residuos (cenizas y carbón). Por lo tanto, de la gasificación de 25 Kg de biomasa se producen 1,205 Kg de residuos.

Primero se procede a calcular el volumen de los residuos con la siguiente formula:

$$volumen = \frac{masa\ de\ residuos}{densidad\ del\ carbón}$$

Se considera la densidad del carbón puesto que este ocupa más volumen, los autores Valverde et al. (2018, p. 26) mencionan que la densidad del carbón de eucalipto va de 0,20 a 0,26 g/cm³, se tomó el valor promedio de 0,23 g/cm³.

$$volumen = \frac{1,205 \text{ Kg}}{0,00023 \frac{\text{Kg}}{\text{cm}^3}}$$

$$volumen = 5239,13 \text{ cm}^3$$

El gasificador consisten en un cilindro con diámetro 37 cm, por lo tanto, se puede despejar la altura (h) de la formula del volumen de un cilindro, así:

$$\pi * r^2 * h = 5239,13 \text{ cm}^3$$

$$h = \frac{5239,13 \text{ cm}^3}{\pi * (18,5 \text{ cm})^2}$$

$$h = 4,9 \text{ cm}$$

Para el diseño de la cámara de residuos se consideró 5 veces mayor que la altura teórica, puesto que en dicha cámara también se acumula el gas pobre producto de la gasificación y así mismo se garantiza que el gas tenga un contenido de cenizas y carbón casi nulo porque la altura de $24,5 \approx 25$ cm retiene parte de los residuos impidiendo así que salgan por la tubería de salida del gas.

3.2.3.3. Altura depósito de biomasa

Primero se determina el volumen del depósito de biomasa, se consideró el consumo de biomasa en carga máxima durante una hora en el proceso de gasificación, cuyo valor es de 25 Kg. Para determinar el volumen que ocupa la biomasa, se utiliza la densidad de la madera que es de $0,579 \text{ g/cm}^3$.

$$volumen = \frac{masa}{densidad}$$

$$volumen = \frac{25 \text{ kg}}{0,000579 \text{ kg/cm}^3}$$

$$volumen = 43177,89 \text{ cm}^3$$

Como el equipo de gasificación es un cilindro, se puede calcular la superficie de la cámara de almacenamiento de biomasa, esta superficie multiplicada por la altura debe ser igual al volumen de biomasa que se utiliza en el proceso de gasificación.

$$\pi * r^2 * h = 43177,89 \text{ cm}^3$$

$$h = \frac{43177,89 \text{ cm}^3}{\pi * (18,5 \text{ cm})^2} = 40,15 \text{ cm}$$

Para el diseño, la altura del depósito de biomasa será de 40 cm por su facilidad de construcción.

3.2.3.4. *Relación entre la superficie de salida de la tobera, A_n , y la superficie de la garganta, A_t , en función del diámetro de la garganta*

Con la ayuda de la siguiente figura se calcula el diámetro de la tubería por la que ingresa aire al gasificador y define la zona de combustión.

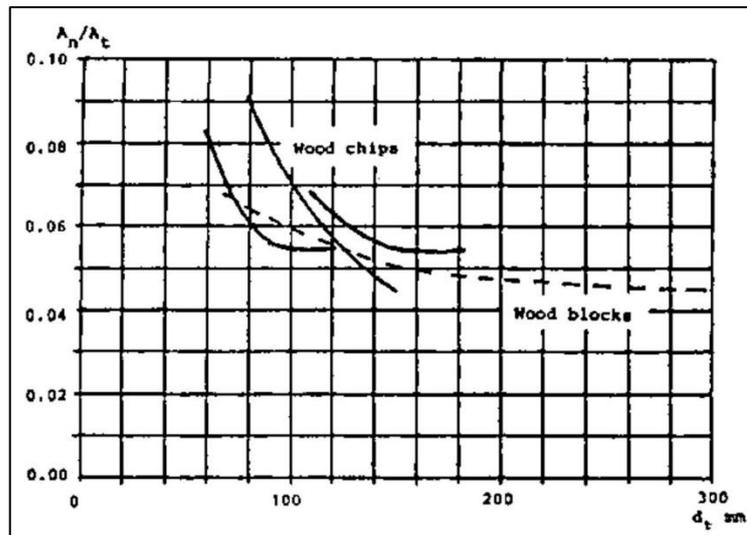


Ilustración 4-3: Directrices de diseño para gasificadores de tiro descendente a relación entre el área de la salida de la tobera y el área en función del diámetro de la garganta

Fuente: FAO, 1986, p. 56.

La relación entre el área total de las toberas (A_n) y el área de la garganta del gasificador (A_t) es:

$$\frac{A_n}{A_t} = C = 0,09$$

El área total de una tobera está definida por:

$$A_n = \pi (dn)^2 * N_t * \frac{1}{4}$$

El área de la garganta es:

$$A_t = \pi (dt)^2 * \frac{1}{4}$$

Al realizar la división $\frac{A_n}{A_t} = C$ se determina el diámetro de la tobera, de la siguiente manera:

$$dn = \sqrt{C * (dt)^2 * \frac{1}{N_t}}$$

$$dn = \sqrt{0,09 * (80)^2 * \frac{1}{1}}$$

Para el diseño del gasificador se decidió colocar un ingreso de aire central que va desde la parte superior del equipo y entrega un flujo directo a la zona de combustión, por lo tanto, el número de tubos (N_t) es igual a 1, y tomando en cuenta el diámetro de la garganta del gasificador, se determina que el diámetro de la tubería por la cual ingresa aire, que es de:

$$dn = 24mm$$

Se debe considerar que la tubería debe tener un diámetro 2,5 veces más que el teórico, puesto que así se garantiza un ingreso de aire correcto que define las zonas de pirólisis, combustión y reducción, aumentando así la eficiencia de la gasificación (Barajas, 2013, p. 83). Entonces, $dn = 60 mm$, para la construcción de gasificador el diámetro de la tubería por la que ingresa aire será de 2 pulgadas, esto por su disponibilidad en el mercado en comparación a una tubería de 60 mm.

3.2.3.5. Cálculo del diámetro de la tubería de salida del gas

Para la determinación del diámetro de salida del gas se hace uso del flujo volumétrico máximo alcanzado de acuerdo con el tipo de gasificador seleccionado (F-5) y también del área de salida

del gas de la parrilla, para poder despejar la velocidad con la que sale el gas. Para conocer esa velocidad se hace uso de la siguiente formula:

$$\dot{V} = v_2 * A$$

Donde:

\dot{V} = Flujo volumétrico máximo de producción de gas ($60 \text{ m}^3/\text{h}$).

v_2 = Velocidad con la que sale el gas.

A = Área ($A = \pi D^2/4$) se debe multiplicar por la cantidad de agujeros en la parrilla que son 142 (este número de agujeros se determinó estableciendo la cantidad máxima de agujeros con diámetro de 5mm que alcanzan en la parrilla, sin considerar el centro de la parrilla que tiene un diámetro de 2 pulgadas que no se debe perforar).

$$v_2 = \frac{\frac{60 \text{ m}^3/\text{h}}{3600}}{\frac{1}{4} * \pi (0,005)^2 * 142}$$

$$v_2 = 5,978 \text{ m/s}$$

Se puede determinar el diámetro de salida de gases se hace uso de la siguiente fórmula:

$$D = \sqrt{\frac{4 * \dot{V}}{v_2 * \pi}}$$

$$D = \sqrt{\frac{4 * \frac{60}{3600}}{5,978 \text{ m/s} * \pi}}$$

$$D = 0,0596 \text{ m} * \frac{100 \text{ cm}}{1 \text{ m}} = 5,96 \text{ cm} \approx 6 \text{ cm}$$

Para la construcción del equipo se utilizó un tubo de salida de gas con diámetro de 2 pulgadas (5,08 cm) debido que comercialmente no se dispone de tubos con diámetros de 6 cm.

3.2.3.6. Determinación de la fórmula empírica de la madera

Se conoce la composición elemental de la biomasa, por lo que es posible calcular la fórmula empírica que define a la madera de eucalipto, siendo:

Tabla 12-3: Cálculo fórmula empírica de la madera

| Elemento | Composición % | Peso atómico | Composición / peso atómico | División para el carbono |
|----------|---------------|--------------|----------------------------|--------------------------|
| C | 46,37 | 12 | 3,86 | 1 |
| H | 5,79 | 1 | 5,79 | 1,5 |
| O | 46,64 | 16 | 2,915 | 0,8 |
| N | 1,2 | 14 | 0,086 | 0,022 |

Realizado por: Noteno, F.; Zapata, S. 2022.

Entonces la fórmula empírica será:



3.2.3.7. Relación aire/combustible para la combustión de la madera

Un proceso de combustión típico ocurre según la siguiente ecuación:

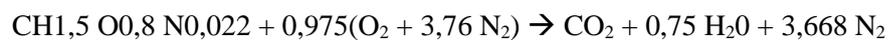


Igualando el oxígeno se tiene:

$$0,8 + 2n = 2 + 0,75$$

$$n = \frac{2,75 - 0,8}{2} = 0,975$$

El balance estequiométrico en un proceso de combustión para la fórmula empírica determinada es:



La relación aire – combustible (AC) representa la cantidad de masa de aire necesario para combustionar una unidad de masa de combustible (Cengel y Boles, 2011: p. 775).

$$AC = \frac{m_{aire} (Kg)}{m_{combustible} (Kg)}$$

$$AC = \frac{0,975 (2 * 16 + 3,76 * 2 * 14)}{(1 * 12 + 1,5 * 1 + 0,8 * 16 + 0,022 * 14)} = 5,03 \frac{\text{kg de aire}}{\text{kg de combustible}}$$

De acuerdo con Barajas (2013, p. 48) para la gasificación solo es necesario el 30% de aire estequiométrico, esto da entonces:

$$AC = 1,5 \frac{\text{kg de aire}}{\text{kg de combustible}}$$

$$\dot{m} = 1,5 \frac{\text{Kg aire}}{\text{Kg combustible}} * \frac{25 \text{ Kg combustible}}{\text{hora}} = 37,5 \frac{\text{Kg aire}}{\text{hora}}$$

3.2.3.8. Cálculo velocidad y flujo volumétrico del aire

Para calcular la velocidad del aire, se debe partir de la ecuación del flujo masico, la cual es:

$$\dot{m} = \rho * v * A$$

Donde:

\dot{m} = flujo másico de aire (Kg/h)

ρ = densidad del aire, se emplea la densidad del aire de la ciudad de Riobamba, que de acuerdo con Arias (2010, p. 127) es 0,843 Kg/m³

v = velocidad del aire (m/s)

A = área de la tubería de ingreso del aire (m²)

La tubería por la que ingresa aire al gasificador tiene un diámetro de 2 pulgadas, por lo tanto, su área es de: 2,026 x 10⁻³ m²

Se procede a despejar la velocidad y reemplazar los datos ya conocidos.

$$v = \frac{\dot{m}}{\rho * A}$$

$$v = \frac{37,5 \text{ kg/h}}{0,843 \text{ kg/m}^3 * 2,026 \times 10^{-3} \text{ m}^2}$$

$$v = 21956,56 \text{ m/h} * \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} = 6,1 \text{ m/s}$$

El cálculo del flujo volumétrico del aire se lo hace con la siguiente ecuación:

$$\dot{V} = v * A$$

$$\dot{V} = 21956,56 \frac{\text{m}}{\text{h}} * 2,026 \times 10^{-3} \text{ m}^2 = 44,48 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

3.2.3.9. Balance de energía

Para el balance de energía se debe partir de la siguiente ecuación:

$$\Delta E_c + \Delta E_p + \Delta H = Q + W$$

La variación de energía cinética, potencial y el trabajo deben ser anulados porque estas no existen durante el proceso de gasificación, quedando así:

$$\Delta H = Q$$

$$Q = h_2 - h_1 = \dot{m} * C_p * (T_2 - T_1)$$

Donde:

Q = calor generado por el proceso de gasificación en watts

\dot{m} = consumo de biomasa en carga máxima, 25 kg/h

C_p = capacidad calorífica de la madera, 10510 J/kg °C

T₂ = temperatura máxima durante el proceso de gasificación, 1200 °C

T₁ = temperatura de la madera, 18 °C

Además, se debe considerar que el equipo se encuentra totalmente aislado entonces no existe pérdidas de calor, se asume que es un sistema adiabático.

$$Q = 25 \frac{Kg}{h} * 10510 \frac{J}{kg \text{ } ^\circ C} * (1200 - 18) \text{ } ^\circ C$$

$$Q = 310570500 \frac{J}{h} * \frac{1 h}{3600 s}$$

$$Q = 86269,58 W$$

3.3. Selección de materiales

3.3.1. Acero A36

Un proceso de gasificación constituye de varias etapas, entre ellas están: secado, pirolisis, oxidación y reducción; cada etapa se puede diferenciar por la temperatura en la que ocurre siendo así: secado (100 °C – 300 °C), pirolisis (300 °C – 600 °C), oxidación (600 °C – 1200 °C), reducción (500 °C – 900 °C). Como se puede evidenciar la temperatura máxima teórica que alcanzaría el equipo es de 1200 °C, por lo que la elección del material de construcción debe ser un acero que soporte dicha temperatura.

Por esta razón, la construcción del equipo es enteramente en acero A36 o también conocido como hierro negro, esto por su costo y su disponibilidad en el mercado nacional. Además, es un acero con buena soldabilidad, un punto de fusión 1526 °C y una temperatura de operación máxima de 1250 °C. A continuación, se muestra algunas propiedades de dicho material.

Tabla 13-3: Propiedades del Acero A36

| Norma técnica | | ASTM 136 / A36M |
|-----------------------------|---------|-----------------|
| Límite de fluencia | | |
| Kg/mm2 | kpsi | Mpa |
| 25,3 min | 36 min | 250 min |
| Resistencia a la tracción | | |
| Kg/mm2 | ksi | Mpa |
| 42 – 56 | 58 – 80 | 400 – 550 |
| Temperatura de fusión °C | | |
| 1480 – 1526 | | |
| Temperatura de operación °C | | |
| 1100 – 1250 | | |

Fuente: AHMSA, 2013, p. 21.

Realizado por: Noteno, F; Zapata, S., 2022

3.3.1.1. *Calculo espesor de las paredes*

Con este cálculo se define el espesor de diseño de las paredes del gasificador, de la cámara de combustión y la cámara de reducción. Para ello, se considera al equipo como un cuerpo sometido a presión interna, proceso que ocurre en equipos como reactores, torres de destilación, intercambiadores de calor, entre otros.

Según ASME (2013, p. 21) se calcula según la siguiente ecuación:

$$t = \frac{P * D}{2 * S * E - 1,2 * P} + C$$

Donde:

t = espesor del cilindro

P = presión de operación, en este caso será de 1 atm = 14,69 psi

D = diámetro interno del cilindro, 370 mm (Tabla 11-3)

S = límite de fluencia del material (acero A36), 36000 psi (Tabla 13-3)

E = eficiencia de soldaduras se toma el valor de 0,60 (León, 2001, p. 14)

C = sobreespesor de corrosión, puesto que el equipo servirá para futuras investigaciones y pruebas continuas se considera 3 mm.

$$t = \frac{14,69 \text{ psi} * 370 \text{ mm}}{2 * 36000 \text{ psi} * 0,60 - 1,2 * 14,69 \text{ psi}} + 3 \text{ mm} = 3,13 \text{ mm}$$

En el mercado nacional no existe acero A36 con un espesor de 3,13 mm por lo que para el diseño se considera el uso de un espesor de 4 mm.

3.3.2. *Acero inoxidable AISI 430*

El equipo consta de una cubierta con fines estéticos, de soporte de la lana de vidrio y como prevención de corrosión atmosférica en el hierro negro. Por esta razón el material elegido fue el acero inoxidable AISI 430 el cual es de tipo ferrítico bajo en carbón y que en ambientes corrosivos tiene una resistencia a la corrosión muy buena. A continuación, se muestra una tabla con la composición química de este acero.

Tabla 14-3: Composición química acero AISI 430

| | |
|-----------|------------------|
| Carbón | 0,12 máx. |
| Manganeso | 1,00 máx. |
| Azufre | 0,030 máx. |
| Fósforo | 0,040 máx. |
| Silicio | 1.00 máx. |
| Cromo | 16,0 a 18,0 máx. |
| Níquel | 0,75 máx. |

Fuente: NKS, 2022, p. 2.

Realizado por: Noteno, F; Zapata, S., 2022.

Los elementos cromo y níquel son los que le otorgan propiedades inoxidable al acero, es por eso que en esta aleación se presenta una buena resistencia a la corrosión a elevadas temperaturas (NKS, 2022, p. 1).

3.3.3. Hierro galvanizado

En el equipo se necesitan algunos accesorios como: dos codos, un codo en T, tubería roscada y un tapón. Los materiales mencionados son de uso común en plomería por lo que se fabrican generalmente en hierro galvanizado. El galvanizado consiste en un revestimiento de una capa de zinc sobre el hierro, lo que le otorga una resistencia al oxido y la corrosión (CB METAL, 2021, p. 3).

3.3.4. Aislantes térmicos

Un aislante térmico es un material cuyo objetivo es retrasar la transferencia de calor ya que su comportamiento es el de una barrera que impide la trayectoria del flujo de calor, pero no la elimina, solo la reduce (Yunus, 2007, pp. 423-430).

Es necesario mencionar que para el diseño del gasificador no es necesario colocar algún aislante térmico, las razones por las que se decidió colocar materiales aislantes son las siguientes:

- Conservación de la energía

La reducción en la velocidad de transferencia de calor ayuda a conservar la energía en un sistema (Yunus, 2007, pp. 423-430). En un proceso de gasificación, en específico en la etapa de reducción existen reacciones endotérmicas las cuales necesitan de un suministro de energía para que se den, por esta razón si se aísla térmicamente se favorece a que ocurran dichas reacciones.

- Protección

En teoría la temperatura máxima que se alcanza en un proceso de gasificación es 1200 °C que se da en la etapa de oxidación o combustión, esta representa un peligro ya que durante el funcionamiento del equipo si cualquier persona accidentalmente toca la superficie del mismo puede sufrir quemaduras. Es por ello que para prevenir accidentes se instaló aislantes térmicos, además de acuerdo a las normas OSHA (Occupational Safety and Health Administration) la temperatura debe ser menor a 60°C en superficies calientes (Yunus, 2007, pp. 423-430).

3.3.4.1. Mortero refractario

El mortero refractario usado es el de la marca EPS REFRACT el cual es un mortero listo para usar, resistente a la acción del fuego y a elevadas temperaturas sin fundirse, deformarse y descomponerse, además resiste cambios bruscos de temperatura sin agrietarse. Está fabricado con arena de cuarzo y soporta temperaturas continuas de operación de hasta 1400 °C.

- *Espesor del mortero refractario*

Para calcular el espesor del mortero refractario se usa la fórmula para la conducción de calor en cilindros.

$$Q = \frac{T_1 - T_2}{\frac{\ln(r_2/r_1)}{2 * \pi * L * K}}$$

Donde:

Q = calor generado por el proceso de gasificación en watts

T1 = temperatura máxima durante el proceso de gasificación, 1200 °C

T2 = temperatura en el exterior del equipo, según las normas OSHA la temperatura en superficies calientes debe ser menor a 60°C

r2 = radio del mortero refractario en cm

r1 = radio de la cámara de reducción, 6 cm

L = longitud del tubo, en este caso tanto a la cámara de combustión y la cámara de reducción se las considera como un tubo de largo de 45,6 cm que corresponde a la sumatoria de las alturas de ambas cámaras.

k = conductividad térmica del mortero refractario que corresponde a 0,4 W/m °C (Anexo A)

Reemplazando valores y despejando r_2 se tiene:

$$86269,58 \text{ W} = \frac{1200^\circ\text{C} - 60^\circ\text{C}}{\frac{\ln(r_2/r_1)}{2 * \pi * 0,456\text{m} * 0,4 \text{ W/m }^\circ\text{C}}}$$

$$\ln(r_2/r_1) = 0,015$$

$$e^{\ln(r_2/r_1)} = e^{0,015}$$

$$\frac{r_2}{r_1} = 1,06$$

$$r_2 = 1,06 * 6\text{cm} = 6,36\text{cm}$$

El espesor del refractario (e) será igual a la diferencia de los radios.

$$e = r_2 - r_1$$

$$e = 6,36\text{cm} - 6\text{cm} = 0,36\text{cm} = 3,6 \text{ mm}$$

3.3.4.2. Lana de vidrio

Para la protección del acero A36 de la corrosión atmosférica, para asegurar más protección y conservación de energía en el equipo se colocó una capa de 40 mm de lana de vidrio hidrorrepelente de la marca ISOVER, la cual repele hasta el 99% de agua y tiene temperaturas de operación que van desde 250 °C a 400 °C (Anexo B). Esta capa cubre toda la superficie del gasificador.

3.4. Forma definitiva del diseño a construir

Se realizó un modelo en 3D en el software SOLIDWORKS del equipo de gasificación.

3.5. Construcción del gasificador

En esta sección del marco metodológico se describirá como fue el proceso de fabricación del equipo, así como de los materiales y equipos usados.

3.5.1. Cámara de combustión

La cámara de combustión es un tronco de cono con dimensiones de 370 mm de diámetro mayor, 80mm de diámetro inferior, una altura de 251.1 mm y un ángulo de 60° con el fin de que la biomasa fluya de mejor manera hacia la cámara de reducción. Este componente del gasificador está fabricado en acero A36.



Ilustración 7-3: Cámara de combustión

Realizado por: Noteno, F; Zapata, S., 2022.

3.5.2. Cámara de reducción

La cámara de reducción es un cilindro fabricado en acero A36 con las siguientes dimensiones: 205 mm de altura y un diámetro de 120 mm, bajo criterio de los autores y con el fin de variar la altura de la parrilla y por lo tanto el cuerpo de la cámara de reducción y evitar también la acumulación o atascamiento de la biomasa se decidió incrementar las dimensiones del diámetro de la cámara de 80 mm a 120 mm.



Ilustración 8-3: Cámara de reducción

Realizado por: Noteno, F; Zapata, S., 2022.

3.5.3. Parrilla y mecanismo de agitación

La parrilla que sirve como soporte de la biomasa, además permite solo el paso de la biomasa que ya combustión y se transformó en ceniza y carbón. Las dimensiones de la parrilla son de 120 mm de diámetro, 6 mm de espesor y consta de 142 huecos, cada uno con un diámetro de 5 mm.



Ilustración 9-3: Parrilla vista inferior

Realizado por: Noteno, F; Zapata, S., 2022.

El mecanismo que permite la agitación de la biomasa está soldado a la parrilla, este consiste en una varilla cuadrada sólida de A36 con espesor de 15 mm y de largo total de 450 mm. Este se puede mover desde la parte inferior del equipo con la ayuda de un volante.



Ilustración 10-3: Agitador y volante

Realizado por: Noteno, F; Zapata, S., 2022.

3.5.4. Mecanismos para variar la altura de la entrada de aire y el volumen de la cámara de reducción

Con el fin de priorizar futuras investigaciones en el equipo de gasificación de biomasa se decidió colocar mecanismos que permitan variar tanto la altura de la entrada de aire como el volumen de la cámara de reducción, estos mecanismos constan de una platina de 70 mm de diámetro que sirve como soporte de empaques de alta temperatura de silicón rojo y que están pegados con silicón de alta temperatura.



Ilustración 11-3: Mecanismo para variar el volumen de la cámara de reducción

Realizado por: Noteno, F; Zapata, S., 2022.

3.5.5. Cilindros

El equipo consta de dos cilindros grandes, el primero fabricado en acero A36 con dimensiones de 370 mm de diámetro y 1106.1 mm de altura, el segundo cilindro fabricado en acero inoxidable AISI 430 con dimensiones de 450 mm de diámetro y 1106.1 mm de altura.



Ilustración 12-3: Cilindro A36 y cilindro AISI 430

Realizado por: Noteno, F; Zapata, S., 2022.

3.5.6. *Tapa superior e inferior*

El diseño de las tapas se realizó en forma de bridas por tanto las tapas superior e inferior constan de un anillo soldado en los bordes del gasificador, de dimensiones: 6 mm de espesor, diámetro mayor de 450 mm y diámetro menor de 370 mm. Se colocó 8 pernos que permiten sujetar una circunferencia con diámetro de 450 mm y 6 mm de espesor, para evitar la fuga del gas se colocó en las bridas abundante silicona de alta temperatura. Tanto el anillo como la circunferencia se fabricaron en acero A36.



Ilustración 13-3: Bridas tapa superior

Realizado por: Noteno, F; Zapata, S., 2022.

3.5.7. *Tapas de alimentación y residuos*

El diseño de las tapas que permiten la alimentación de biomasa y recolección residuos (cenizas y carbón) se lo hizo en forma de bridas rectangulares, con dimensiones de 120 mm de largo, 120 mm de alto y 4 pernos en la tapa de alimentación, la tapa para la recolección de residuos tiene 150 mm de largo, 100 mm de alto y 6 pernos. En el caso de estas tapas es necesario abrir y cerrar con frecuencia por lo que se colocó empaques de asbesto para evitar la fuga del gas.



Ilustración 14-3: Brida rectangular alimentación

Realizado por: Noteno, F; Zapata, S., 2022.

3.5.8. *Aislantes térmicos*

En el caso de los aislantes térmicos se colocaron dos, el primero es lana de vidrio con espesor de 40 mm la cual se colocó con la ayuda de una cinta adhesiva de aluminio y el segundo es mortero refractario fabricado con arena de cuarzo el cual se colocó en todo el volumen comprendido entre las cámaras de combustión y reducción con el cilindro de acero A36. El criterio para rellenar todo ese volumen de refractario radica en que según cálculos el espesor óptimo para lograr una temperatura exterior de 60 °C es de 3,6 mm, pero como se mencionó en la sección 3.3.4. al estar un sistema completamente aislado se conserva la energía, hecho que resulta favorable durante el proceso de gasificación ya que así se prioriza que ocurran las reacciones endotérmicas de la zona de reducción.



Ilustración 15-3: Lana de vidrio

Realizado por: Noteno, F; Zapata, S., 2022.

Así mismo si en algún momento se requiere cambiar el mortero refractario por motivos de mantenimiento se colocó una tapa desmontable con pernos que sirve también como soporte del mortero.



Ilustración 16-3: Tapa desmontable del mortero refractario

Realizado por: Noteno, F; Zapata, S., 2022.

3.5.9. Estructura de soporte del equipo

Para la construcción de la estructura que sirve de soporte al equipo se usó tubos cuadrados de acero A36 de dimensiones 25 x 25 mm.



Ilustración 17-3: Estructura de soporte del equipo

Realizado por: Noteno, F; Zapata, S., 2022.

3.5.10. Tubos y accesorios

Se usaron tubos de acero A36 de 2 pulgadas y 2 mm de espesor para la alimentación del aire y de soporte para la parrilla de cenizas. Para el sistema de alimentación de aire se usaron dos codos de hierro galvanizado unidos al tubo de A36 además de una T que permite la división del flujo de aire suministrado por el blower. Para el tubo que permite el encendido de la biomasa se usó solo hierro galvanizado que consta de un tubo roscado de 2 pulgadas y 235 mm de longitud, para luego tapar el tubo del encendido se colocó un tapón redondo hembra roscado.

La tubería de salida del gas es de acero A36 de 2 pulgadas y 150 mm de longitud, le sigue un pequeño tramo de tubería roscada, una unión, 300 mm de longitud de tubo y una reducción de 2 pulgadas a 1 pulgada, estos últimos accesorios son fabricados en hierro galvanizado.



Ilustración 18-3: Tubo de alimentación de aire y salida del gas

Realizado por: Noteno, F; Zapata, S., 2022.

3.5.11. Equipos

3.5.11.1. Corte

Para el proceso de corte se usó una cortadora de plasma para las planchas de acero y la fabricación de las bridas, una amoladora con un disco de corte de 7 pulgadas y una tronzadora para el corte de los tubos.



Ilustración 19-3: Corte con plasma

Realizado por: Noteno, F; Zapata, S., 2022.

3.5.11.2. Soldadura

En la construcción de equipo lo que respecta a soldadura se usó básicamente dos tipos: la soldadura MIG para lo referente al acero A36 y la soldadura TIG para el acero inoxidable.



Ilustración 20-3: Soldadura MIG y soldadura TIG

Realizado por: Noteno, F; Zapata, S., 2022.

3.5.11.3. *Rolado*

Lo que respecta la fabricación de los cilindros y del tronco de cono se lo hizo con la ayuda de la roladora.



Ilustración 21-3: Roladora

Realizado por: Noteno, F; Zapata, S., 2022.

3.5.11.4. *Perforaciones*

Los agujeros de la parrilla de cenizas se lo hicieron con un taladro de pedestal y una broca 5 mm, los agujeros de las bridas con una broca de ½ pulgada y un machuelo para el roscado.



Ilustración 22-3: Taladro de pedestal

Realizado por: Noteno, F; Zapata, S., 2022.

3.5.12. Sistema eléctrico

El sistema eléctrico del gasificador de biomasa consta de un gabinete eléctrico, sensores de temperatura, controladores, un blower, una luz piloto, breaker de riel y un protector de voltaje, es necesario mencionar que el sistema funciona con una conexión de 120 voltios.



Ilustración 23-3: Tablero de control

Realizado por: Noteno, F; Zapata, S., 2022.

3.5.12.1. Termocuplas

Se instalaron dos sensores de temperatura conectados con cable concéntrico al gabinete, los cuales tienen las siguientes especificaciones:

Tabla 15-3: Termocuplas características

| Característica | Rango | Tipo |
|--------------------------|-------------|------|
| Termocupla tornillo | 0 – 500 °C | K |
| Termocupla con termopozo | 0 – 1200 °C | K |

Realizado por: Noteno, F; Zapata, S., 2022.

3.5.12.2. Controladores

Se instalaron dos controladores de temperatura de la marca CAMSCO con las siguientes especificaciones:

Tabla 16-3: Controladores características

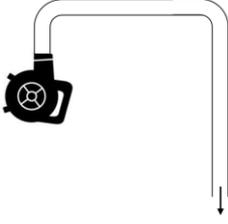
| Característica | Rango | Tensión | Termocuplas compatibles |
|----------------------------------|--------|---------|-------------------------|
| Controlador CAMSCO digital 48x48 | 1200°C | 110 V | K, J, PT 100 |

Realizado por: Noteno, F.; Zapata, S., 2022.

3.5.12.3. Blower

Con la ayuda de un anemómetro se ajustó el flujo de aire necesario que el blower debe inyectar al equipo de gasificación. Para ello, se midió la velocidad de aire cuando el blower se encuentra conectado al tubo que permite el ingreso del aire al equipo, teniendo los siguientes resultados:

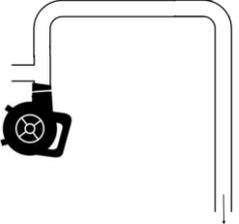
Tabla 17-3: Velocidad del aire que expulsa el blower sin la T

| Estado del regulador de la velocidad del aire | Velocidad de aire (m/s) | Esquema |
|-----------------------------------------------|-------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| Abierto | 11,4 |  |
| En medio | 10,7 | |
| Cerrado | 8,6 | |

Realizado por: Noteno, F.; Zapata, S., 2022.

Para la gasificación se necesita solo el 30% del aire estequiométrico, magnitud que se garantiza cuando la velocidad del aire a la salida del tubo de alimentación sea de 6,1 m/s, razón por la cual se colocó una T que permite la división del flujo de aire.

Tabla 18-3: Velocidad del aire que expulsa el blower con la T

| Estado del regulador de la velocidad del aire | Velocidad del aire (m/s) | Esquema |
|-----------------------------------------------|--------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| Abierto | 8,0 |  |
| En medio | 6,7 | |
| Cerrado | 4,7 | |

Realizado por: Noteno, F.; Zapata, S. 2022

Se debe colocar el en medio el regulador de la velocidad del aire del blower para que así se asegure que el flujo de aire sea del 30% respecto al estequiométrico.

3.6. Costos

3.6.1. Costos construcción del gasificador

A continuación, se muestran el costo de los materiales y procesos usados en la construcción del equipo:

Tabla 19-3: Costos construcción del gasificador

| N° | Descripción | Cantidad | Precio unitario (USD) | Precio final (USD) |
|----|---------------------------|-----------|-----------------------|--------------------|
| 1 | Acero A36 4 mm | 1 plancha | 210 | 210 |
| 2 | Acero A36 6 mm | ½ plancha | 140 | 140 |
| 3 | Acero inoxidable AISI 430 | ½ plancha | 45 | 45 |
| 4 | Varilla roscada 716 | 1 m | 8 | 8 |
| 5 | Pernos 716 1/2 | 20 | 0.95 | 19 |
| 6 | Tuercas 716 | 10 | 0.25 | 2.50 |
| 7 | Tubo cuadrado 1/4 x 1/8 | 2 | 18 | 36 |
| 8 | Tubo rectangular 10 x 50 | 70 cm | 20 | 20 |
| 9 | Fibra de vidrio | 3 kg | 8.33 | 25 |
| 10 | Mortero refractario | 60 kg | 180 | 180 |
| 11 | Pintura alto trafico | 1 litro | 25 | 25 |
| 12 | Disolvente (thinner) | 2 litros | 3 | 6 |
| 13 | Tubo redondo 2 pulgadas | 1.20 m | 20 | 20 |
| 14 | Corte plasma | - | 180 | 180 |
| 15 | Soldadura MIG | - | 400 | 400 |
| 16 | Soldadura TIG | - | 15 | 15 |
| 17 | Tubo cuadrado 3/4 A36 | 1 | 7 | 7 |

| | | | | |
|--------------------|-------------------------------------------|-------|--------|---------|
| 18 | Cilindrada | - | 70 | 70 |
| 19 | Empaque alta temperatura | 2 | 5 | 10 |
| 20 | Silicona alta temperatura | 5 | 3.80 | 19 |
| 21 | Mano de obra | - | 412.50 | 412.50 |
| 22 | Tapón hembra roscado 2 pulgadas | 1 | 2.30 | 2.30 |
| 23 | Tubería acero galvanizado 2 pulgadas | 30 cm | 4.71 | 4.71 |
| 24 | Unión acero galvanizado 2 pulgadas | 1 | 3.94 | 3.94 |
| 25 | T acero galvanizado 2 pulgadas | 1 | 8.50 | 8.50 |
| 26 | Reducción acero galvanizado 2 a 1 pulgada | 1 | 2.75 | 2.75 |
| 27 | Asbesto 60 x 60 | 1 | 8 | 8 |
| VALOR TOTAL | | | | 1880.20 |

Realizado por: Noteno, F; Zapata, S., 2022.

3.6.2. Costos instalación eléctrica

Se muestra en la siguiente tabla el costo de la instalación eléctrica y de los sensores en el equipo.

Tabla 20-3: Costos instalación eléctrica

| N° | Descripción | Cantidad | Precio unitario (USD) | Precio final (USD) |
|--------------------|------------------------------------------------|----------|-----------------------|--------------------|
| 1 | Controlador de temperatura CAMSCO 48x48 1200°C | 2 | 36.84 | 73,69 |
| 2 | Gabinete eléctrico 22x17x22 | 1 | 9.11 | 9,11 |
| 3 | Prensa estopa CAMSCO | 3 | 0.33 | 1 |
| 4 | Breaker riel | 1 | 5.83 | 5.83 |
| 5 | Cable concéntrico #3x16 | 5 m | 0.92 | 4,64 |
| 6 | Enchufe polarizado plástico 110V | 1 | 1.73 | 1.73 |
| 7 | Luz piloto verde | 1 | 1.50 | 1.50 |
| 8 | Protector de voltaje 110V | 1 | 16.18 | 16.18 |
| 9 | Termocupla tornillo tipo K 500°C | 1 | 8.90 | 8.90 |
| 10 | Termocupla con termopozo tipo K 1200°C | 1 | 175 | 175 |
| 11 | Mano de obra | - | 100 | 100 |
| 12 | Cable termocupla C105/6/7 | 5 m | 3,64 | 18.20 |
| VALOR TOTAL | | | | 415.78 |

Realizado por: Noteno, F.; Zapata, S. 2022

3.6.3. Otros costos

Se refiere a costos relacionados a transporte, materiales usados en las pruebas de funcionamiento del equipo y varios.

Tabla 21-3: Otros costos

| N° | Descripción | Cantidad | Precio unitario (USD) | Precio final (USD) |
|--------------------|------------------------------|----------|-----------------------|--------------------|
| 1 | Transporte | - | 80 | 80 |
| 2 | Tanque de propano 400 gramos | 3 | 15 | 45 |
| 3 | Llave #14 con matraca | 1 | 5.75 | 5.75 |
| 4 | Impresiones | - | 45 | 45 |
| 5 | Empastado | 1 | 60 | 60 |
| 6 | Variables | - | 200 | 200 |
| VALOR TOTAL | | | | 453.75 |

Realizado por: Noteno, F.; Zapata, S. 2022

3.6.4. Costo total

Incluye la sumatoria de los costos de construcción, de la instalación eléctrica y de otros costos.

Tabla 22-3: Costo total

| N° | Descripción | Cantidad | Precio unitario (USD) | Precio final (USD) |
|--------------------|-------------------------------------|----------|-----------------------|--------------------|
| 1 | Costos construcción del gasificador | 1 | 1879.03 | 1880.20 |
| 2 | Costos instalación eléctrica | 1 | 380.61 | 415.78 |
| 3 | Otros costos | 1 | 453.75 | 453.75 |
| VALOR TOTAL | | | | 2749.73 |

Realizado por: Noteno, F.; Zapata, S. 2022

3.7. Parámetros de funcionamiento del equipo

3.7.1. Operación del equipo

3.7.1.1. Encendido

El proceso de encendido del equipo inicia con:

- Desempeñar las tapas de la compuerta de entrada de biomasa y la compuerta del depósito de cenizas.

- Inspeccionar interior del gasificador, debemos asegurarnos de que se encuentre completamente vacío y limpio en todo su interior.
- Colocar la parrilla en la cámara de reducción y se verificar que todos los seguros de la misma se encuentren correctamente puestos.
- Conectar el equipo a una toma eléctrica de 120V y esperar hasta que el regulador faculte su encendido para poder alzar el breque del papel de control.
- Depositar la biomasa en el gasificador por la compuerta de alimentación.
- Colocar las tapas de la compuerta de alimentación y cenizas asegurándose ajustar todos los pernos.
- Encender la biomasa inyectando calor en la cámara de combustión (se debe verificar que la biomasa se encuentre completamente encendida asegurándose que existan brasas en ese punto).
- Cerrar el acceso a la cámara de combustión (considerar que antes de colocar la tapa se debe colocar teflón industrial para maximizar la hermeticidad)
- Encender el blower y verificar que se encuentre regulado en el aire estequiométrico.

Considerar que en caso de que el flujo de salida del gas comienza a variar o a entrecortarse, se debe mover el volante que se encuentra en la parte inferior del equipo, esto favorece la caída continua de biomasa de forma homogénea lo que favorece la salida del gas. A continuación, el diagrama de flujo del encendido del equipo.



Ilustración 24-3: Diagrama de flujo encendido del equipo

Realizado por: Noteno, F; Zapata, S., 2022.

3.7.1.2. Encendido del gas

Para encender el gas es necesario que primero en el interior del equipo se alcance las temperaturas de combustión de mínimo 600°C y reducción de mínimo de 500°C, como la etapa de combustión es la que proporciona el calor necesario a la etapa de reducción y esta última etapa es la que garantiza mayor producción de gases inflamables debemos estar atentos a las temperaturas alcanzadas en estas etapas. Es por eso que el Gasificador de Biomasa cuenta con una termocupla con termo pozo de nivel industrial (1200°C) que permite tomar las lecturas de temperatura en la cámara de combustión del equipo.

Considerar que el tiempo estimado que tarda el equipo para alcanzar las temperaturas de gasificación está entre 20 a 25 min, este valor se lo determinó mediante pruebas de funcionamiento, después de este tiempo se puede observar que la producción de gas pobre es continua. Para encender el flujo de gas debemos considerar los siguientes puntos:

- Para prender el gas se puede usar cualquier dispositivo que genere una llama (mechero, fosforera, fósforos, etc.)
- Durante el transcurso operativo del equipo es normal que el flujo de gas pobre generado disminuya, en estos casos se debe usar el agitador del equipo que permite homogenizar y distribuir la biomasa de mejor manera en su interior. (el agitador mejorará la producción de gas)
- Tener precaución en la tubería de salida del gas y la cámara de cenizas, debido a que estos puntos alcanzan temperaturas elevadas por la alta temperatura del gas pobre.
- Es recomendable que el encendido del gas pobre se realice en espacios libres de corrientes de aire, debido a que corrientes muy fuertes de aire dificultan el encendido del gas e inclusive apagan la llama de la combustión del gas.

3.7.1.3. Apagado

Para finalizar proceso, el flujo de salida del gas empezará a reducirse hasta que llegue al punto que comienza a salir solo aire caliente, esto nos garantizará que la biomasa en el interior del equipo se ha consumido por completo. Una vez finalizada la práctica se debe:

- Apagar el blower.
- Bajar el breque que se encuentra en el panel de control.
- Desconectar el equipo de gasificación de la toma de corriente eléctrica de 120V.
- Desempeñar las tapas de las compuertas de alimentación y la compuerta de cenizas (esto ayudará a que la temperatura al interior del equipo baje más rápido).

3.7.1.4. Limpieza del equipo

Finalizado el trabajo se debe considerar que el interior del equipo está a altas temperaturas, se debe esperar un tiempo (1 hora a 1 hora y media) hasta que la temperatura baje y se pueda acceder al equipo sin riesgos de quemadura. Es importante asegurarse que el equipo se encuentre libre de biomasa o carbón para lo cual se debe revisar las cámaras de combustión, reducción y el acceso lateral que existe hacia la cámara de combustión. En caso de que aún exista biomasa en el interior se debe proceder a quitar los seguros de la parrilla y bajarla sacándola de la cámara de combustión, esto facultará la caída de biomasa hacia la cámara de cenizas lo que facilita la limpieza.

3.7.2. Capacidad del equipo

El equipo de gasificación de biomasa tiene un volumen interno de: 56588 cm^3 , el volumen comprende la cámara de reducción, combustión, pirólisis y secado de biomasa, considerando parrilla abajo. La capacidad total en kilogramos de biomasa que puede entrar en el equipo depende de la densidad del material usado en el proceso de gasificación, en el caso del triturado de madera de eucalipto esta tiene una densidad de (1,065g/ml) y considerando el volumen del equipo se determina que el equipo tiene una capacidad de alimentación de biomasa de 12,5Kg

El depósito de cenizas tiene una capacidad volumétrica de $26880,25 \text{ cm}^3$, considerando su capacidad en kilogramos debemos tener en cuenta la cantidad de cenizas generada por cantidad de biomasa alimentada al equipo.

3.7.3. Medidas de prevención

Cuando el equipo está en funcionamiento las temperaturas en las cámaras de combustión y reducción son muy elevadas, pero debido a que estas cámaras se encuentran cubiertas por material refractario y después por lana de vidrio la transferencia de calor se reduce y hace que en el exterior de estas cámaras sea libre de riesgos de quemadura.

Por otro lado, la cámara de cenizas alcanza elevadas temperaturas a lo largo de las paredes, tanto en su interior como su exterior, esto a pesar de que esta cámara se encuentra cubierta con lana de vidrio que actúa como aislante, se debe tomar precauciones en estas zonas para evitar accidentes. Existen otros puntos del equipo de gasificación donde se corre riesgo de quemadura para lo cual se debe tener precauciones como:

- La tapa lateral de acceso a la cámara de reducción
- La tapa de la compuerta a la cámara de cenizas.
- Los tubos galvanizados de la salida del gas.

También se debe considerar que el gas pobre generado es de elevado poder calorífico para lo cual se debe tener cuidado de quemarse a la hora de encender.

3.7.4. Mantenimiento del equipo

El mantenimiento del equipo debe efectuar una vez al año y debe estar a cargo del Técnico autorizado quien efectúe su revisión y determine las condiciones del equipo, entre los principales aspectos a considerar tenemos:

- Parrilla: se debe observar que la parrilla no se haya pandeado producto de las altas temperaturas alcanzadas durante el funcionamiento del equipo.
- Blower: verificar que el equipo se encuentre perfectamente funcional, esto con la ayuda de un anemómetro que compruebe que la velocidad de salida de aire no haya disminuido.
- Termocuplas: para determinar que óptimo funcionamiento de las termocuplas se debe comparar las lecturas tomadas por estos sensores y las lecturas que emite un pirómetro.
- Estructura del equipo: revisar anomalías como deformaciones, grietas o rupturas que se puedan presentar en cualquier parte estructural del equipo (En caso de haber problemas estructurales acudir al manual de mantenimiento).

3.8. Pruebas en el gasificador

3.8.1. Condiciones estándar de funcionamiento

Construido el equipo se procedió a realizar pruebas que garanticen su funcionamiento, se llevó a cabo diferentes ensayos en las que se variaron diferentes parámetros en el equipo, como, por ejemplo: La posición de la parrilla en la cámara de reducción, la altura de la tubería de entrada de aire, la cantidad de biomasa alimentada al equipo y también el flujo de aire.

Para cada uno de los parámetros mencionados existen medidas estándar de funcionamiento, como es el caso de la altura de la tubería que inyecta aire al gasificador, según (FAO, 1986) en su tabla de las principales dimensiones de un gasificador se determina que la distancia entre el tubo de aire y la garganta de la cámara de combustión debe de ser de 12,5cm.

Respecto a la distancia que debe tener parrilla en la cámara de reducción la norma establece que la altura debe de ser de 20,5cm, esta altura se obtiene cuando la parrilla está completamente abajo sostenida por los seguros que impiden su caída a la cámara de residuos.

Respecto a la cantidad de biomasa alimentada cabe recalcar que la normativa establece que para este tipo de gasificador seleccionado (F-5) el flujo de consumo de biomasa es de 25Kg/h. Es preciso mencionar que el equipo tiene una capacidad máxima de almacenamiento de biomasa de 12,5 kilogramos de madera triturada de eucalipto.

El flujo de aire necesario que requiere el equipo para la gasificación de biomasa es de 37,5 kg de aire/hora. Para proporcionar esta cantidad de aire es necesario regular el flujo que aire que envía el blower, esto se hace abriendo y cerrando la compuerta de entrada de aire al blower.

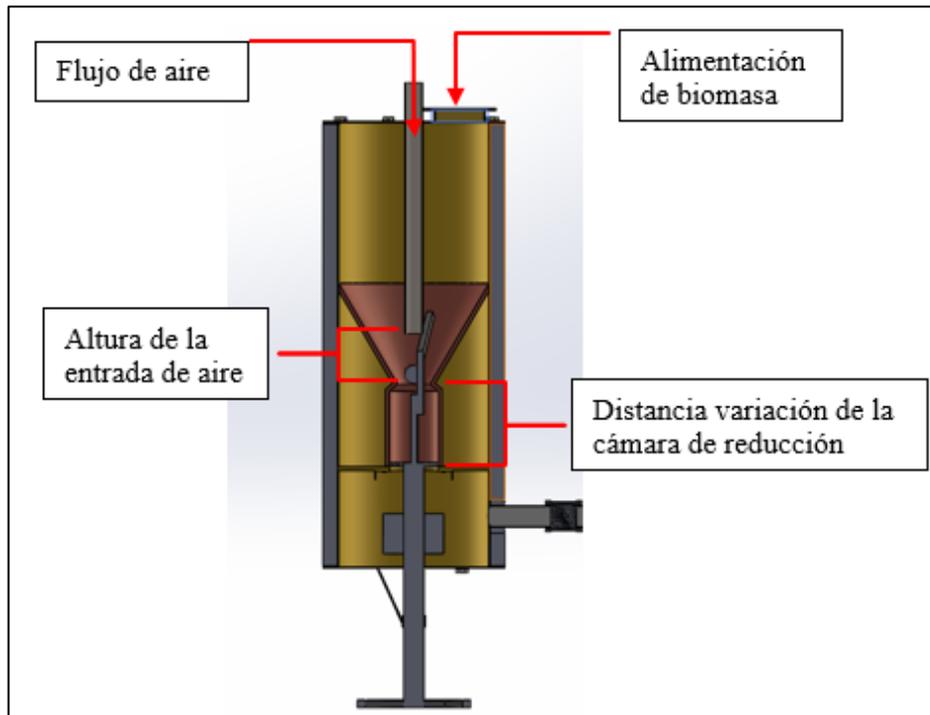


Ilustración 25-3: Parámetros que se pueden variar en el equipo de gasificación

Realizado por: Noteno, F; Zapata, S., 2022.

A continuación, se describen los resultados de las pruebas realizadas, en las que se varió cada uno de los parámetros mencionados.

3.8.2. Variación en la cámara de reducción

El primer parámetro por manipular es la cámara de reducción, en este caso se realizó dos pruebas de funcionamiento.

PRIMERA: Parrilla abajo, en este caso la distancia entre la garganta de la cámara de combustión y la parrilla es de 20,5 cm.

El equipo de gasificación funcionó correctamente, los primeros 5 minutos se empieza a observar que se libera humo denso producto del encendido de la biomasa, después se observa un ligero cambio de color en el humo que empieza a tomar tintes tenues de amarillo, si se observa este color en la corriente de salida de gases, es muy probable que el humo se prenda durante un periodo corto de tiempo, después la corriente de salida de humo no se prenderá. Pasado un tiempo estimado de 20 minutos el gas empieza a generarse de forma continua, esto es así hasta que se termine la biomasa.

SEGUNDA: Parrilla arriba, en este caso la distancia entre la garganta de la cámara de combustión y la parrilla es de 3 cm.

Como resultado se obtuvo que la producción de gas pobre es inferior en comparativa a la primera prueba de funcionamiento, al inicio, la corriente de salida de humo no es inflamable debido a que

el calor proporcionado en el encendido del equipo solo está en la etapa de combustión y conforme el blower inyecta aire en ese punto la combustión aumenta y el calor se propaga hacia las otras etapas de la gasificación. En la etapa de combustión se generan algunos compuestos inflamables como el monóxido de carbono o el hidrógeno, pero gracias a esta prueba se determina que la mayor generación de gases de combustión los produce en la cámara de reducción, esto es así debido que al reducir el volumen de la cámara de reducción también se reduce la producción de gas pobre.

3.8.3. *Variación en la altura de la entrada de aire*

Para esta prueba se varió la altura de la tobera de inyección de aire respecto a la garganta de la cámara de combustión. El sistema de inyección de aire al interior del equipo puede subir y bajar en conformidad al desplazamiento permisible del blower, mismo que se encuentra sostenido en una estructura con cuatro varillas enroscadas en las que se puede fijar una posición con los pernos. La distancia mínima que puede haber entre la tubería de inyección de aire respecto a garganta de la cámara de combustión es de 11 centímetros y la distancia máxima es de 29,3 cm. Se realizaron dos pruebas de funcionamiento en conformidad a estas distancias, mínima y máxima para lo cual se pudo observar que el funcionamiento del equipo es el mismo para estas dos alturas.

3.8.4. *Variación flujo de aire*

El flujo de aire se ajusta con el mecanismo de entrada de aire del blower. Se determinó que la entrada de aire estándar que requiere la gasificación es de 37,75Kg/hora, es decir que la velocidad de salida que debe tener el blower es de 6,1 m/s.

Para las pruebas se varió la velocidad de salida del aire que genera el blower, las velocidades probadas fueron de 4,7m/s, es la velocidad que proporciona el blower cuando está cerrado y 8 m/s este último es la velocidad que proporciona el blower cuando está completamente abierto.

Como resultados de la variación del flujo se puede observar que a medida que se aumenta la velocidad del aire, la temperatura en el interior del equipo aumenta, esto es debido a que se proporciona una mayor cantidad de oxígeno a las reacciones de combustión lo que maximiza la generación de calor. El aumento de la velocidad del aire resulta un problema a la hora de encender el gas debido a que este se disipa rápidamente lo que dificulta el encendido constante. Cuando se regula el blower a la cantidad de aire estequiométrico determinado se observa que al prender el gas la llama se mantiene por más tiempo.

3.8.5. Variación en la cantidad de biomasa empleada

Se realizaron pruebas en las que se varió la cantidad de biomasa empleada en el proceso de gasificación trabajando con 2 kilos, 5 kilos y 10 kilos. Como resultados se concluye que a menor cantidad de biomasa empleada más rápido es el proceso de gasificación, con 2 kilos de biomasa, el proceso de gasificación demora alrededor de 10 a 15 minutos en iniciar la etapa de producción de gas continuo. Cuando se emplea 5 kilos de biomasa, la etapa de producción de gases constantes tarda alrededor de 20 minutos. Y cuando se trabaja con 10 kilos de biomasa el proceso de gasificación demora alrededor de 30 o 45 minutos en alcanzar el punto de producción de gas constante.

CAPÍTULO IV

4. MARCO DE ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

4.1. Resultados

El presente trabajo de Integración Curricular con el tema: “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN GASIFICADOR PARA EL APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO DE BIOMASA”, se realizó mediante revisión bibliográfica de investigaciones, revistas científicas, libros, tesis y el conocimiento adquirido a lo largo del desarrollo de la carrera, permitiendo así construir un equipo de gasificación cuyo objetivo es la transformación de biomasa en un gas combustible mediante procesos termoquímicos (pirolisis, oxidación, reducción) la aplicación de calor y un agente gasificante.

Para el dimensionamiento y diseño del gasificador se empezó recolectando en bibliografía información acerca de las variables de diseño en gasificadores y se definió las siguientes: temperatura, tiempo de permanencia, agente gasificante, presión y geometría. Autores como Ramírez (2011, p. 22) y Nogués et al. (2010, p. 54) mencionan que las temperaturas definen cada etapa en el proceso de gasificación, estas son: secado (100 °C – 300 °C), pirolisis (300 °C – 600 °C), oxidación (600 °C – 1200 °C), reducción (500 °C – 900 °C), por lo que es imposible realizar gasificación sin estar en estos rangos de temperatura; si el tiempo de permanencia de la biomasa y el residuo carbonoso es mayor aumenta la generación de gases; el uso del agente gasificante define el tipo de gas combustible a producir siendo el caso para este proyecto aire con el cual se genera gas pobre, la presión de operación generalmente es la atmosférica pero si en el interior del equipo existe un aumento de presión esto genera la producción de hidrocarburos lo cual aumenta la producción de gases combustibles en el gas pobre y finalmente la geometría de las cámaras de combustión y reducción para evitar zonas muertas en el equipo y maximizar las reacciones que allí ocurren al favorecer el tiempo de contacto gas – sólido.

Con la consideración de estos parámetros y mediante un proceso de selección se decidió construir un gasificador tipo downdraft tomando en cuenta sus múltiples ventajas como lo son potencia, eficiencia, fabricación, montaje, mantenimiento, operatividad, aplicaciones, seguridad, costos, transporte y tipo de combustible generado. Para definir las dimensiones del equipo se caracterizó la biomasa a gasificar mediante normativas ASTM y métodos internos de laboratorio teniendo los siguientes resultados: humedad del 11,66 %, ceniza el 0,216% y material volátil el 86,5%. FAO (1986, pp. 27-29) menciona que respecto a humedad para generar un combustible algo seco la biomasa debe tener un porcentaje de humedad menor al 25% además, que altos contenidos de humedad hacen que el calor se use para secar la biomasa y no en las reacciones de reducción; para evitar escoria en el combustible el porcentaje de ceniza debe ser menor a 5 – 6 %; por regla general

si el porcentaje de material volátil es mayor a 10 debe usarse en un gasificador downdraft y el tamaño de la partícula depende de las dimensiones de la garganta siendo en este caso de 8 cm por lo que la biomasa debe tener un tamaño menor a 3 cm para evitar atascamientos.

Tomando en cuenta los parámetros mencionados en los dos anteriores párrafos y mediante los cálculos para el diseño del gasificador mencionados en la sección 3.2.3. se logró construir un equipo de gasificación de biomasa con las siguientes especificaciones.

Tabla 1-4: Especificaciones gasificador downdraft

| Gasificador de biomasa | |
|-------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Tipo | Downdraft |
| Material de construcción | Acero A36 de 4 mm Acero inoxidable AISI 430 |
| Aislante térmico | Fibra de vidrio Mortero refractario |
| Capacidad | 12.5 kg |
| Agente gasificante | Aire (30% respecto al estequiométrico) |
| Voltaje | 120 V |
| Diámetro garganta | 80 mm |
| Altura cámara de reducción | 205 mm |
| Residuos (cenizas y carbón) | 0,603 kg |
| Biomasa | |
| Tipo | Residuos forestales de eucalipto |
| Humedad | < 25% |
| Tamaño promedio de partículas | < 3 cm |
| Relación aire-combustible | 1,5 kg aire / kg combustible |
| Carga al gasificador | Manual |
| Gas de salida | |
| Tipo | Gas pobre |
| Caudal | 7 – 60 m ³ /h |
| Composición (% mol) | Metano, 11,008; etano, 0,997; etileno, 2,603; propano, 0,236; propileno, 0,812; acetileno, 0,057; 1-buteno, 0,088; i-butileno, 0,086; c-2-buteno, 0,076; 1,3-butadieno, 0,077; c-2-penteno, 0,282; n-hexano, 0,251; N ₂ , 20; O ₂ , 20; CO ₂ , 2,729; H ₂ , 11,299 y CO 29,399 |

Realizado por: Noteno, F; Zapata, S., 2022.

Para priorizar futuras investigaciones y trabajos de integración curricular se colocó mecanismos que permitan variar la altura de la entrada el aire y el volumen de la cámara de reducción para formular varias hipótesis respecto a la calidad del gas producido, también se puede emplear otro agente gasificante y cualquier tipo de biomasa.

4.2. Balance de masa del proceso de gasificación

Para los cálculos de balance de masa del proceso y por componente se tomó los datos según las condiciones de operación estándar del equipo, siendo estas: altura de la entrada de aire respecto a la garganta de 12,5 cm y altura de la cámara de reducción de 20,5 cm.

El balance de masa del proceso de gasificación se puede representar según el siguiente esquema, en donde se considera todas las entradas y salidas. Para ello mediante experimentación se determinó que por la gasificación de 5 Kg de biomasa se genera 0,241 Kg de residuos (cenizas y carbón) en 1 hora.

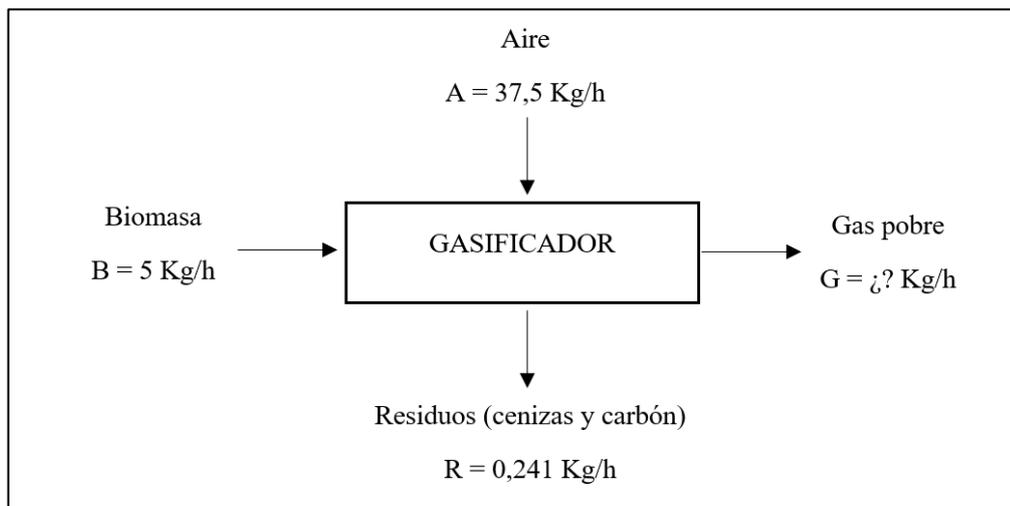


Ilustración 1-4: Balance de masa en el proceso de gasificación

Realizado por: Noteno, F; Zapata, S., 2022.

Para conocer la cantidad de gas pobre generado durante la gasificación, se procede a realizar el balance de masa:

$$ENTRADA = SALIDA$$

$$A + B = R + G$$

$$\dot{m}_A + \dot{m}_B = \dot{m}_R + \dot{m}_G$$

$$\dot{m}_G = \dot{m}_A + \dot{m}_B - \dot{m}_R$$

$$\dot{m}_G = 37,5 + 5 - 0,241$$

$$\dot{m}_G = 42,26 \text{ Kg/h}$$

Durante la gasificación de 5 Kg/h de biomasa se generan 42,26 Kg/h de gas pobre.

4.3. Balance de masa por componentes

Se puede representar esquemáticamente el balance de masa por componentes del proceso de gasificación, puesto que se conocen todos los componentes de las corrientes.

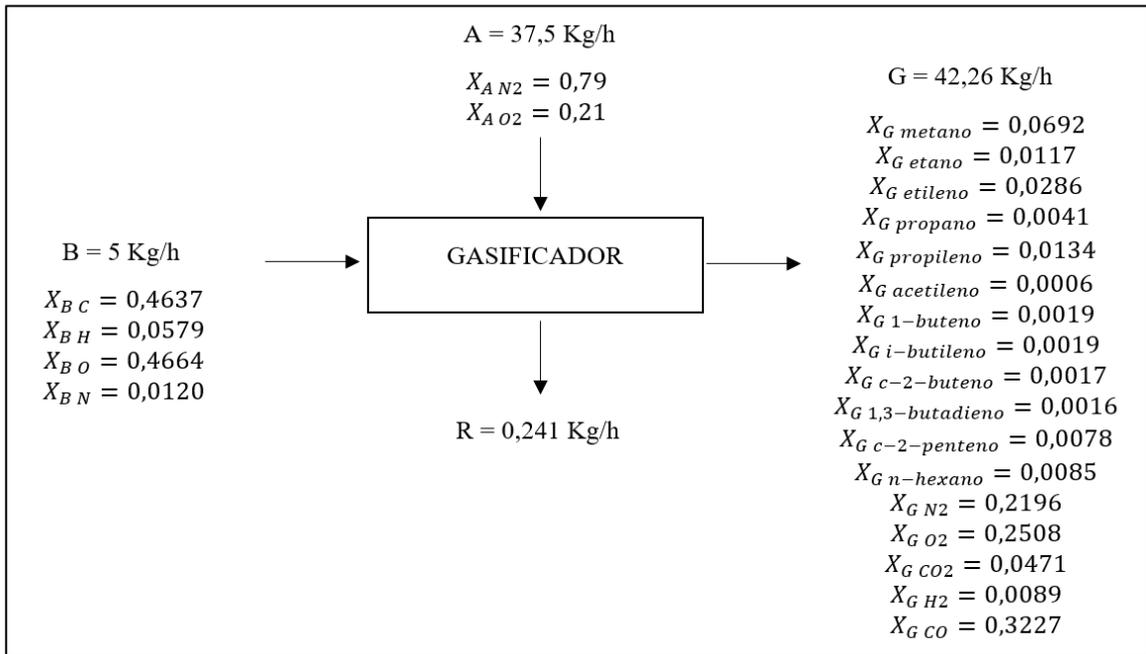


Ilustración 2-4: Balance de masa por componentes

Realizado por: Noteno, F; Zapata, S., 2022.

Donde:

X_B = fracciones que componen la biomasa

X_A = fracciones que componen el aire

X_G = fracciones que componen el gas pobre (Anexo C)

Se puede evidenciar que las fracciones que conforman el gas pobre producido por la gasificación de biomasa son gases combustibles a excepción del CO_2 , N_2 y O_2 .

A continuación, se muestra una tabla resultado de la cromatografía de gases que se realizó al gas pobre y por medio de la cual se conoció la composición de salida del gas.

Tabla 2-4: Resultados cromatografía de gases del gas pobre

| Compuesto | % mol | % Peso |
|-----------------|--------|--------|
| Metano | 11,008 | 6,919 |
| Etano | 0,997 | 1,175 |
| Etileno | 2,603 | 2,861 |
| Propano | 0,236 | 0,408 |
| Propileno | 0,812 | 1,339 |
| Acetileno | 0,057 | 0,058 |
| 1-buteno | 0,088 | 0,193 |
| i-butileno | 0,086 | 0,189 |
| c-2-buteno | 0,076 | 0,167 |
| 1,3-butadieno | 0,077 | 0,163 |
| c-2-penteno | 0,282 | 0,775 |
| n-hexano | 0,251 | 0,848 |
| N ₂ | 20 | 21,956 |
| O ₂ | 20 | 25,079 |
| CO ₂ | 2,729 | 4,707 |
| H ₂ | 11,299 | 0,893 |
| CO | 29,399 | 32,270 |

Realizado por: Noteno, F; Zapata, S., 2022.

4.4. Discusión

Con base a los resultados que se obtuvo de la cromatografía de gases, el gas pobre producto de la gasificación de biomasa de eucalipto con aire como agente gasificante presentó los siguientes compuestos: metano, 11,008%; etano, 0,997%; etileno, 2,603%; propano, 0,236%; propileno, 0,812%; acetileno, 0,057%; 1-buteno, 0,088%; i-butileno, 0,086%; c-2-buteno, 0,076%; 1,3-butadieno, 0,077%; c-2-penteno, 0,282%; n-hexano, 0,251%; N₂, 20%; O₂, 20%; CO₂, 2,729%; H₂, 11,299% y CO 29,399%; es evidente que de los gases producidos todos son de tipo combustible a excepción del N₂, O₂ y CO₂. Los autores Rodríguez y Tumbaco (2016, p. 109) obtuvieron gas pobre con la siguiente composición: aire, 24,54%; metano, 13,67%; CO₂, 12,87%; H₂O, 0,02%; CO, 40,5% y H₂, 12,45%; usando como biomasa cascarilla de arroz y aire como agente gasificante el cual no reacciono completamente y esta aun presente en el gas. Por otra parte, el autor Badilla (2019, p. 70) mediante la gasificación con pellets de eucalipto y aire obtuvo un gas pobre conformado por: CO, 18,13%; CO₂, 18,70%; metano, 17,46% y H₂, 12,61%.

En comparación a los resultados de los autores antes mencionados se puede mencionar que, es muy evidente que el gas pobre que se genero tiene presencia de hidrocarburos esto debido a que existió un aumento en la presión interna del equipo lo que favoreció a la formación de dichos compuestos esto resulta beneficioso en el proceso puesto que son gases combustibles que aportan valor energético al gas; así mismo existe un exceso de aire que no reacciono y se evidencia en la cromatografía esto debido a que para realizar la toma de la muestra para el análisis fue necesario

incrementar el flujo de aire; también se tiene un porcentaje muy bajo de dióxido de carbono lo cual es igualmente beneficioso ya que este compuesto no es combustible y además es contaminante, su bajo porcentaje se debe a que todo el CO₂ formado en la etapa de combustión reacciona según la reacción R14 (ver ilustración 3-2); no existe la presencia de H₂O puesto que se usó biomasa con un porcentaje de humedad del 11,66% el cual asegura que el gas producido será relativamente seco, finalmente el resto de compuestos le otorgan un valor energético al gas y se encuentran en un buen porcentaje. Se menciona en FAO (1986, p. 18) que una composición típica de gas de madera producto de la gasificación es de: N₂, 50-54%; CO, 17-22%; CO₂, 9-15%; H₂, 12-20% y metano, 2-3%.

CONCLUSIONES

Se logró cumplir con el objetivo de diseñar y construir un equipo de gasificación de biomasa, para aprovechar los residuos sólidos forestales de eucalipto y transformarlos en gas pobre, que es un gas combustible con mayor versatilidad en cuanto a aplicaciones se refiere. Respecto a los objetivos específicos, se logró cumplir con todos ellos de forma exitosa como se menciona a continuación.

- Se caracterizó física y químicamente la biomasa residual forestal de eucalipto que se emplea en el proceso de gasificación, los resultados de la caracterización física que la madera, establecen que la densidad es de $0,579 \text{ g/cm}^3$ y el contenido de humedad es de 11,66%. Por otro lado, respecto a la caracterización química de la madera se obtiene que el porcentaje de cenizas que se genera de la combustión es de 0,216%; el porcentaje de material volátil es del 85,5% y el porcentaje de carbón fijo determinado es del 0,36%, también mencionar que se determinó la capacidad calorífica (C_p) de la biomasa que tiene un valor de $10,51 \text{ J/g } ^\circ\text{C}$.
- Mediante el uso de fuentes bibliográficas se pudo reconocer las variables de diseño del equipo de gasificación, estas variables son: La temperatura, tiempo de permanencia de la biomasa en la etapa de combustión, el agente oxidante y la presión. Gracias al reconocimiento de estas variables se logró comprender de mejor manera el proceso de gasificación y de esa forma se pudo justificar los resultados obtenidos de las pruebas de funcionamiento.
- Se aplicaron distintos cálculos y conocimientos de ingeniería relacionados directamente con balance de materia, balance de energía, transferencia de calor, termodinámica y selección de materiales los cuales fueron de gran utilidad para el dimensionamiento de cada componente del equipo de gasificación, además el diseño previo del gasificador se lo elaboro en el software SOLIDWORKS.
- Se logró la validación técnica del gasificador, esto se hizo con un comité de validación al que se le mostro el funcionamiento correcto del equipo, así como sus características generales y futuras aplicaciones de este.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda diseñar los siguientes equipos del proceso que permite purificar el gas pobre, obtenido del gasificador de biomasa. El proceso de obtención de un gas con mayor valor está constituido por un sistema de filtrado, enfriamiento, almacenamiento y medición.
- Se recomienda implementar un sistema de control automático al equipo de gasificación que permita mover la parrilla agitando la biomasa cuando el flujo de gas de síntesis disminuya.
- Para la medición del flujo de salida del gas es recomendable implementar un sensor de medición de caudal que soporte altas temperaturas.
- Para un mayor control y registro de datos del equipo, es recomendable implementar más sensores de temperatura en las cámaras de reducción, cenizas y en la zona de secado de biomasa.
- Se recomienda cubrir las paredes de la cámara de cenizas con una capa de material refractario, esto con el objetivo de minimizar la transferencia de calor del interior de la cámara hacia el exterior.
- Como el gas pobre obtenido puede ser empleado para diferentes usos, es recomendable efectuar estudios de viabilidad técnica, económica y comercial que justifique su producción a nivel industrial, considerando el hecho que el gasificador utiliza biomasa residual de poco valor comercial para generar gas pobre con un mayor valor.
- Se recomienda realizar análisis a los otros residuos derivados del proceso de gasificación, como es el caso de: Alquitrane, cenizas, bio-aceite y carbón. Esto con el propósito de aprovechar estos residuos empleándolos para otras actividades.
- Se recomienda realizar investigaciones sobre el tipo de materia prima que mayor rendimiento genere en el proceso de gasificación, teniendo presente que distintos tipos de biomasa tienen diferentes composiciones, por lo tanto, se generan diferentes productos.
- Para el uso del equipo se recomienda primero leer las guías de laboratorio en donde se describe los pasos a seguir en los procesos de encendido, operación y limpieza del equipo.

BIBLIOGRAFÍA

AHMSA. *Manual de diseño para la construcción con acero* [en línea]. México: Altos Hornos de México, 2013. [Consulta:20 de abril 2022]. Disponible en: https://www.ahmsa.com/assets/files/manuales/MANUAL_AHMSA_2.pdf

ALNOUSS, AHMED, MCKAY, GORDON Y AL-ANSARI, TAREQ. “Optimización de Superestructuras para la Producción de Combustibles, Fertilizantes y Energía a partir de Gasificación de Biomasa.” *Simposio Europeo de Ingeniería de Procesos Asistida por Ordenador* [En línea], 2019, (USA) 46, pp. 301-306. [Consulta:25 de abril 2022]. disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818634-3.50051-5>.

ALVARADO, JUAN Y SAMSON, ERIC. “ENFOQUE”. *La era petrolera se acaba* [En línea], 2018, (Ecuador)1(55), pp 1-3. [Consulta:25 de mayo 2022]. ISSN 1390-7999. Disponible en: https://www.usfq.edu.ec/sites/default/files/2020-07/enfoque_2018_12.pdf.

ARIAS, PABLO. Diseño de un sistema de secado de madera para la empresa Parquet "LOS PINOS". [En línea] (Trabajo de titulación) (Tercer Nivel). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Mecánica. Riobamba, Ecuador. 2010. pp. 127- 128. [Citado el: 3 de agosto de 2022]. Disponible en: <http://dspace.epoch.edu.ec/bitstream/123456789/875/1/15T00462.pdf>.

ASME. *ASME Boiler and Pressure Vessel Committee on Pressure Vessels*. New York: THE AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS, 2013. P 21.

BADILLA, OSCAR. Puesta en marcha de un gasificador de flujo concurrente para el aprovechamiento energético de residuos biomásicos. (Trabajo de titulación) (Tercer Nivel). San José-Costa Rica: Universidad de Costa Rica, 2019. P 70.

BARAJAS, FABIÁN. Diseño y construcción de un gasificador para el aprovechamiento energético de la biomasa residual forestal de la universidad industrial de Santander [En línea] (Trabajo de titulación) (Tercer Nivel). Bucaramanga, Colombia. 2013. pp. 32-83. [Citado el: 8 de agosto de 2022]. Disponible en: <http://tangara.uis.edu.co/biblioweb/tesis/2013/147322.pdf>

BLANCO, NAPOLEÓN.” Selección de gasificador para la generación de energía eléctrica a pequeña escala empleando biomasa agrícola. Selección de gasificador para la generación de energía eléctrica a pequeña escala empleando biomasa agrícola”. *Nexo* [En línea], 2021,

(Nicaragua) 34(02), P 620. [Consulta: 28 de abril de 2022]. ISSN 1995-9516. Disponible en: <https://camjol.info/index.php/NEXO/article/view/11547/13382>. 1995-9516.

BORJA, MUÑOZ. Recuperación energética de residuos biomásicos agrícolas, urbanos y forestales. [En línea] (Trabajo de titulación) (Tercer Nivel) Universidad Pontificia Comillas. Madrid, España. 2021. P 9. [Consulta: 18 de julio de 2022]. Disponible en: https://repositorio.comillas.edu/xmlui/bitstream/handle/11531/53944/TFG_PereraMunoz%2cBorja.pdf?sequence=1&isAllowed=y

BUN-CA. *Manuales sobre energía renovable: Biomasa*. San José, Costa Rica: Biomass Users Network, 2002. ISBN: 9968-904-02-3. PP 11-43.

CABEZAS, JONATAN. Diseño a escala laboratorio de un gasificador de lecho móvil. [En línea] (Trabajo de titulación) (Tercer Nivel) Universidad Piloto de Colombia. Bogotá, Colombia. 2019. P 18. [Consulta: 28 de julio de 2022]. Disponible en: <http://repository.unipiloto.edu.co/handle/20.500.12277/4832>

CARRASCO, LUIS. Diseño y construcción de un gasificador de lecho fijo para la producción de gas de síntesis. [En línea] (Trabajo de titulación) (Tercer Nivel) Universidad Nacional del Callao. Callao, Perú. 2015. P 14. [Consulta: 30 de mayo de 2022]. Disponible en: <http://repositorio.unac.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12952/1114/45.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

CB METAL. *Características del acero galvanizado* [blog]. 23 de febrero 2021. [Citado el: 31 de Julio de 2022]. Disponible en: <https://www.cbmetal.com.pe/blog/caracteristicas-acero-galvanizado/>.

CENGEL, Y Y BOLES, M. *Termodinámica*. Séptima. México: McGraw-Hill, 2011. ISBN 978-607-15-0743-3. P 775.

CULLISPUMA, JORGE. Estado del arte de la matriz energética y análisis de la conveniencia del Programa Nacional de Biocombustibles para Ecuador. [En línea] (Trabajo de titulación) (Tercer Nivel) Universidad Central del Ecuador, Quito, Ecuador. 2021. P 46. [Consulta: 5 de agosto de 2022]. Disponible en: <http://www.dspace.uce.edu.ec/bitstream/25000/22713/1/T-UCES-0004-CAG-305.pdf>.

ESPINOZA, V; et al “Future oil extraction in Ecuador using a Hubbert approach”. *Energy*, Vol. 182, (2019), (Ecuador) pp. 520 - 534.

FAO. *Wood gas as engine fuel*. Roma- Italia: Department forestall 1986. ISBN 92-5-102436-7. pp 9-60.

FONSECA, JUAN CARLOS. Diseño y construcción de un dosificador de biomasa forestal para gasificador tipo downdraft ubicado en el Laboratorio de Térmicas de la Facultad de Mecánica de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. (Trabajo de titulación) [En línea] (Tercer Nivel) Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador. 2017. P 49. [Consulta: 15 de mayo de 2022]. Disponible en: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/8080/1/15T00679.pdf>

HERRERA, RAÚL. Análisis térmico de un gasificador tipo downdraft al combustionar residuos forestales. (Trabajo de titulación) [En línea] Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Ingeniería Mecánica, Riobamba, Ecuador. 2019. P 87. [Consulta: 17 de junio de 2022]. Disponible en: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/13243/1/15T00721.pdf>

LEÓN, JUAN. *Diseño y cálculo de recipientes a presión*. México: Ingeniería León, 2001, p 14.

NKS. *Acero Inoxidable 430*. [Blog]. 2022. [Consulta: 31 de Julio de 2022]. Disponible en: <https://nks.com/es/distribuidor-de-acero-inoxidable/acero-inoxidable-430/>.

NOGUÉS, FERNANDO; et al. *Energía de la biomasa*. Zaragoza, España : Prensas de la Universidad de Zaragoza, 2010. pp. 287-302.

NUNES, LEONEL JR. “Biomass gasification as an industrial process with an effective proof of concept: a comprehensive review of technologies, processes and future developments”. *Engineering results* [En línea], 2022, (USA) 14, P 35. [Consulta: 17 de julio de 2022]. ISSN 2590- 1230. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100408>.

RAMÍREZ, RUBIO. “Gasificación de materiales orgánicos residuales”. *Ingeniería e Investigación* [En línea], 2011, (Colombia) 31(2), pp 17-25. [Consulta: 19 de septiembre de 2022]. ISSN 0120- 5609. Disponible en: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-56092011000300003

RODRÍGUEZ, L & TUMBACO, K. Diseño y construcción de un gasificador para producir gas de síntesis a partir de la combustión de cascarilla de arroz [En línea] (Trabajo de titulación) (Tercer Nivel). Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Mecánica, Quito, Ecuador. 2016. P 109. [Consulta: 11 de mayo de 2022]. Disponible en: <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/16846>

SÁNCHEZ, ORIOL. Diseño y construcción de un sistema de generación eléctrica mediante gasificación de biomasa. [En línea] (Trabajo de titulación) (Tercer Nivel). Universidad Politécnica de Catalunya, Facultad de Ingeniería Eléctrica, Barcelona, España. 2015. P 109. [Consulta: 8 de junio de 2022]. Disponible en: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/25234/TFG.pdf>

SEOÁNEZ CALVO, M. *Tratado de la biomasa: con especial incidencia sobre la biomasa como fuente energética.* Madrid, España: McGraw-Hill, 2013, p. 31.

TOSCANO, V Y VÁSCONEZ, B. Diseño y construcción de un equipo para la reducción de tamaño de los residuos de poda de la ESPOCH. [En línea] (Trabajo de titulación) (Tercer Nivel). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Ingeniería Química, Riobamba, Ecuador. 2015. P 23. [Consulta: 22 de junio de 2022]. Disponible en: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/4115/1/96T00292%20UDCTFC.pdf>

VALVERDE, J; et al. “Caracterización física y química del carbón de tres segmentos de fuste y ramas de *Eucalyptus camadulensis* proveniente de plantaciones dendroenergéticas.” *Revista Forestal Mesoamericana Kúru.*, Vol. 15, (2019), (Costa Rica) P 26.

VARGAS SALGADO, D. Estudio comparativo de la utilización de las tecnologías de gasificación downdraft y lecho fluido burbujeante para la generación de energía eléctrica en aplicaciones de baja potencia. [En línea] (Trabajo de titulación) (Doctoral). Universidad Politécnica de Valencia, Facultad de Ingeniería Energética, Valencia, España 2012. PP 69-104.

VILLACÍS, DIANA. Diseño de un sistema para la obtención del gas pobre en el gasificador downdraft de la Escuela de Ingeniería Mecánica. [En línea] (Trabajo de titulación) (Tercer Nivel). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Mecánica, Riobamba, Ecuador. 2016. P 23. [Consulta: 10 de agosto de 2022]. Disponible en: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/4944/1/15T00631.pdf>

YUNUS, CENGEL. *Transferencia de calor y masa*. Tercera. México: McGraw-Hill Interamericana, 2007. ISBN-13: 978-0-07-312930-3. P 775.



DIRECCION DE BIBLIOTECAS
Y RECURSOS PARA EL APRENDIZAJE
Y LA INVESTIGACION
LIBRARI
Ing. Jhonatan Parreño Uquillas MBA
ANALISTA DE BIBLIOTECA 1

ANEXOS

ANEXO A: FICHA TÉCNICA MORTERO REFRACTARIO

MORTERO REFRACTARIO

EPS[®] REFRACT

MORTERO REFRACTARIO

| | |
|-------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Descripción | EPS REFRACT es un mortero listo para usar, resiste la acción del fuego y altas temperaturas sin fundirse, deformarse ni descomponerse, resiste las alternancias y cambios de temperaturas entre los distintos puntos de su masa sin agrietarse. Fabricado con arena de cuarzo. |
| Dónde usar | Sirve como revestimiento de hormigones, hornos de templado y reverbero, calderas acorazadas, estufas de secado, etc. |
| Requisitos para buen acabado | <ul style="list-style-type: none">✓ El primer calentamiento se debe realizar subiendo la temperatura 50° C cada hora desde la temperatura ambiente hasta los 500° C y mantener esta temperatura durante 2 a 3 horas.✓ Las siguientes subidas de temperatura se pueden realizar a velocidad normal ya que el mortero resiste dichas oscilaciones sin problema.✓ Si se requieren refuerzos de acero como anclajes, se tendrá en cuenta la diferencia de expansión entre el acero y el mortero. Se deberá recubrir el acero con pintura bituminosa, grasa, etc. para acomodar la distinta expansión térmica y evitar la fisuración del mortero.✓ Se debe prever un espesor de 12 a 25 mm. desde la superficie caliente, para que los anclajes no superen los 400° C. |
| Rendimiento | 22 Kg. rinden para 1 m ² de mortero de 1 cm de espesor. |
| Forma de empleo | Sólo basta añadir 7 litros de agua por cada 40 kilogramos de EPS REFRACT. El curado se debe iniciar justo después del inicio del fraguado y prolongar durante, al menos, 24 horas. La puesta en servicio se recomienda a partir de un día de colocado el EPS REFRACT. |
| Presentación | Bolsa de 40 Kg. |
| Conductividad térmica | 0,4 W/ m °C |

ANEXO B: FICHA TÉCNICA LANA DE VIDRIO



Ficha Técnica Lana de Vidrio Libre ISOVER

PRESENTACIÓN:

Filtro de lana de vidrio Hidrorepelente ISOVER

CONDUCTIVIDAD TERMICA: 0,041 W/ (m*K)

APLICACIÓN:

Aislamiento térmico y acústico, para ser instalado sobre cielorrasos suspendidos, hornos y entretechos en posición horizontal o inclinado sin carga. Tabiques interiores y exteriores.

TEMPERATURA DE OPERACIÓN: 250 – 400°C

REACCIÓN AL FUEGO:

INCOMBUSTIBLE

RE1 según Norma IRAM 11910

MO según Norma UNE 23727

DENSIDAD ÓPTICA DE HUMOS:

NIVEL 1

No emite humos oscuros, ni desprende partículas encendidas.

No produce gases tóxicos.

COEFICIENTE DE ABSORCIÓN ACÚSTICA:

Entre 250 a 2000 Hz

Filtro Liviano 50mm NRC: 0.71

Filtro Liviano 100mm NRC: 0.85

NCH 352 / 1.Of.2000

HIDROREPELENCIA:

El proceso hidrorepelente, le otorga un importante atributo a la lana de vidrio ISOVER, manteniendo inalterable sus propiedades térmicas, acústicas y de protección al fuego ante cualquier filtración de agua. Repele el 99% de agua. Según Norma EN 1609 método A absorbe: 0.07kg/ m2 agua. Cumple con la norma ASTM C 726-00.

SUSTENTABILIDAD:

La utilización de las lanas de vidrio hacen sustentables las construcciones.

Mejora y disminuye sensiblemente los consumos de calefacción y refrigeración dado que se minimizan las pérdidas de energía y las emisiones de CO2. Ahorro de energía >66% en costo de gas y electricidad. En la fabricación de las lanas de vidrio se utiliza un 70% de vidrio reciclado.

PROPIEDADES DEL FILTRO LIVIANO FL HR:

Bajo coeficiente de conductividad. Coeficiente constante. Alta resistencia térmica.

Contribuye al ahorro energético. Mantiene la temperatura constante en el interior, más fresca en verano y más cálida en invierno Seguridad frente al fuego.

Excelente aislante acústico y fonoabsorbente. Material dimensionalmente Fácil de cortar e instalar. Se adapta a las distintas irregularidades de las estructuras. No corrosiva. No reacciona con la humedad. Su elasticidad permite rellenar y acomodarse bien en espacios pequeños. Producto sustentable. Su utilización hace sustentable los espacios habitables. Por su compresibilidad permite reducir costos de transporte, almacenamiento y las emisiones de CO2. Reduce las emisiones de CO2 durante el uso del inmueble. Inalterable a los agentes externos. Mantiene sus propiedades a través del tiempo. Resistente a los productos químicos. No resulta comestible para los insectos.

TABLA DE PRODUCTOS

| Producto | Ancho (ml) | Largo (ml) | m2 | Lana ISOVER R100 | APLICACIÓN: |
|--------------|------------|------------|----------------------|------------------|------------------|
| Rollo 40 mm | 0.6 | 44 | 26.4 m ² | 98 | TABIQUE INTERIOR |
| Rollo 40 mm | 1.2 | 12 | 14.4m ² | 98 | MURO EXTERIOR |
| Rollo 50 mm | 0.6 | 36 | 21.6 m2 ² | 122 | ATICO |
| Rollo 50 mm | 1.2 | 12 | 14.4 m ² | 122 | TECHO INCLINADO |
| Rollo 60 mm | 0.6 | 30 | 18 m ² | 146 | |
| Rollo 60 mm | 1.2 | 12 | 14.4 m ² | 146 | |
| Rollo 80 mm | 0.6 | 24 | 14.4 m ² | 195 | |
| Rollo 80 mm | 1.2 | 12 | 14.4 m ² | 195 | |
| Rollo 100 mm | 0.6 | 18 | 10.8 m ² | 244 | |
| Rollo 120 mm | 1,2 | 8 | 9.6 m ² | 293 | |
| Rollo 140 mm | 1,2 | 6 | 7.2 m ² | 341 | |
| Rollo 160 mm | 1,2 | 5 | 6 m ² | 390 | |

*R100 representa coeficiente de resistencia térmica de la lana de vidrio Isover. * El peso de los rollos fluctúa entre 14 y 18 kg.



La aislación sustentable

ANEXO C: CROMATOGRAFÍA DE GASES DEL GAS POBRE



UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA
ÁREA DE INVESTIGACIÓN



INFORME DE RESULTADOS DE LABORATORIO

1. Información general

| | | | |
|-------------------------------------------|--------------------------|----------------------------|--------------|
| Orden de trabajo N°: | 043 | N° Informe: | 043 |
| Razón Social / Nombres Apellidos: | Paul Palmay | Ref. Proforma: | AI-2022- 043 |
| RUC ó CI: | 1754421517 | | |
| Dirección: | Riobamba | | |
| Fecha de emisión: | 5 de agosto de 2022 | | |
| Fecha de muestreo: | N/A | Muestra tomada por: | Cliente |
| Fecha de recepción de la muestra: | 4 de agosto del 2022 | | |
| Fecha de realización del análisis: | 4 de agosto del 2022 | | |
| Correo electrónico: | fredy.inca@esPOCH.edu.ec | | |
| Teléfono: | 0987616920 | | |
| Persona de Contacto: | Paul Palmay | Teléfono: | 0987616920 |

2. Especificaciones del ensayo

| | |
|-----------------------|--------------------|
| Muestra: | Gas |
| Descripción: | Gas |
| Tipo: | N/A |
| Equipo: | RGA Agilent |
| Lugar: | Laboratorio A-212 |
| Analista: | Ing. Nahum Herrera |
| Descripción: | Método interno |
| Observaciones: | |

3. Resultados

| tr (min) | % (mol) | Molécula |
|----------|---------|---------------|
| 0.815 | 11.008 | methane |
| 0.925 | 0.997 | ethane |
| 1.063 | 2.603 | ethylene |
| 1.388 | 0.236 | propane |
| 2.088 | 0.812 | propylene |
| 2.6 | 0.057 | acetylene |
| 3.296 | 0.088 | 1-butene |
| 3.492 | 0.086 | i-butylene |
| 3.589 | 0.076 | c-2-butene |
| 4.126 | 0.077 | 1,3-butadiene |
| 5.174 | 0.282 | c-2-pentene |
| 5.559 | 0.251 | n-hexane |
| 1.951 | >20 | nitrogen |
| 2.273 | >20 | oxygen |
| 4.269 | 2.729 | CO2 |
| 1.062 | 11.299 | hydrogen |



UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA
ÁREA DE INVESTIGACIÓN



Firma de la institución convalidada por:
**PABLO ANDRES
LONDONO LARREA**

Ing. Pablo Londoño
Responsable técnico
5 de agosto de 2022

El informe no se puede reproducir de manera total o parcial sin la autorización del laboratorio.
Descargo de responsabilidad por muestreo o información entregada por el cliente

FIN DEL INFORME

ANEXO D: GASIFICADOR CONSTRUIDO



ANEXO E: GASIFICADOR EN FUNCIONAMIENTO



ANEXO F: BIOMASA A GASIFICAR (TRITURADO DE EUCALIPTO)



ANEXO G: VALIDACIÓN DEL GASIFICADOR



ANEXO H: ACTA DE VALIDACIÓN DEL GASIFICADOR CONSTRUIDO

ACTA DE VALIDACIÓN DE EQUIPO

En la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, el día 28 del mes Julio del año 2022 a las 9:30 a.m. se da la validación técnica del equipo Gasificador de Biomasa ubicado en el Laboratorio de Operaciones Unitarias, autorizado por los docentes miembros de la comisión: Ing. Mabel Parada y Ing. Darío Guamán.

Se presentan así algunos aspectos generales:

- **Título Trabajo de Integración Curricular:**

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN GASIFICADOR PARA EL APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO DE BIOMASA

- **Autores:**

Fabrizio Arsenio Noteno Bautista

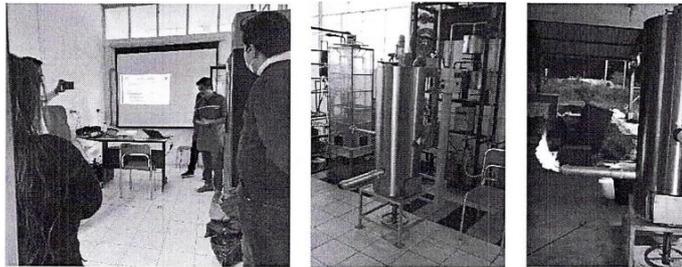
Luis Sebastian Zapata Trujillo

- **Características generales de funcionamiento**

Objetivo: Transformación de biomasa en un gas combustible mediante procesos termoquímicos (pirólisis, oxidación, reducción), la aplicación de calor y un agente gasificante.

| General | |
|-------------------------------|----------------------------------------|
| Nombre del equipo | Gasificador de biomasa |
| Tipo | Downdraft |
| Material de construcción | Acero A36 Acero inoxidable AISI 430 |
| Aislante térmico | Fibra de vidrio Mortero refractario |
| Capacidad | 12.5 kg |
| Agente gasificante | Aire (30% respecto al estequiométrico) |
| Voltaje | 120 V |
| Biomasa | |
| Tipo | Residuos forestales de eucalipto |
| Humedad | < 25% |
| Tamaño promedio de partículas | < 3 cm |
| Relación aire-combustible | 1,5 kg aire / kg combustible |
| Carga al gasificador | Manual |
| Gas de salida | |
| Tipo | Gas pobre |

- **Evidencia fotográfica**



Por medio de la presente acta se otorga la VALIDACIÓN TÉCNICA del Gasificador de Biomasa considerando que el mismo se encuentra en condiciones adecuadas de funcionamiento para ser entregado en el Laboratorio de Operaciones Unitarias.

Firmas:



Ing. Mabel Parada

Miembro Comisión de Validación



Ing. Darío Guamán

Miembro Comisión de Validación



epoch

Dirección de Bibliotecas y
Recursos del Aprendizaje

UNIDAD DE PROCESOS TÉCNICOS Y ANÁLISIS BIBLIOGRÁFICO Y
DOCUMENTAL

REVISIÓN DE NORMAS TÉCNICAS, RESUMEN Y BIBLIOGRAFÍA

Fecha de entrega: 03 / 01 / 2023

| |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| INFORMACIÓN DEL AUTOR/A (S) |
| Nombres – Apellidos: Luis Sebastian Zapata Trujillo Fabricio Arsenio Noteno Bautista |
| INFORMACIÓN INSTITUCIONAL |
| Facultad: Ciencias |
| Carrera: Ingeniería Química |
| Título a optar: Ingeniero Químico |
| f. Analista de Biblioteca responsable: Ing. Leonardo Medina Ñuste MSc. |

x


DIRECCIÓN DE BIBLIOTECAS
Y RECURSOS PARA EL APRENDIZAJE
Y LA INVESTIGACIÓN
Ing. Jonathan Parreño Uquillas MBA
ANALISTA DE BIBLIOTECA 1

2416-DBRA-UTP-2022