

**DISEÑO CONCEPTUAL DE UN GASIFICADOR PARA LA PRODUCCIÓN DE
GAS DE SÍNTESIS A PARTIR DE RESIDUOS DE PODA GENERADOS EN
LA UNIVERSIDAD EAFIT**

**Marcela Aristizábal Álvarez
Liliana Valencia Naranjo**

**PROYECTO DE GRADO PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERÍA DE
PROCESOS**

Asesor:
Germán Camilo Quintana Marín
Doctor en ingeniería

Co-asesora:
Gloria Velásquez Giraldo
Estudiante de Maestría de Ingeniería

**UNIVERSIDAD EAFIT
ESCUELA DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE PROCESOS
MEDELLÍN
2015**

CONTENIDO

LISTA DE TABLAS	v
LISTA DE FIGURAS	vi
RESUMEN	1
1. INTRODUCCIÓN	2
1.1 Planteamiento del problema	2
1.2 Justificación	3
1.3 Preguntas de investigación	4
1.4 Objetivos	5
1.4.1 Objetivo general	5
1.4.2 Objetivos específicos	5
2. MARCO REFERENCIAL	6
2.1 Definiciones básicas	6
2.2 Proceso de la gasificación	6
2.3 Importancia de la gasificación	7
2.4 Especificaciones técnicas	8
2.4.1 Tipos de gasificadores	8
2.4.2 Etapas internas del proceso de gasificación	10
2.4.3 Reacciones presentes en la gasificación	11
2.4.4 Parámetros importantes para el diseño	12
2.5 Aplicaciones de la gasificación	13
3 DIAGNÓSTICO Y CARACTERIZACIÓN DE LOS RESIDUOS DE PODA DE LA UNIVERSIDAD EAFIT	15
3.1 Descripción y manejo de los residuos de poda	15
3.2 Clasificación de la madera	17
3.3 Propiedades químicas de los residuos de poda	18
3.4 Punto de fusión de las cenizas de los residuos de poda	19
3.5 Propiedades físicas de los residuos de poda	19

3.5.1	Análisis próximo	19
3.5.2	Humedad.....	20
3.5.3	Poder calorífico	20
3.5.4	Densidad bulk	20
3.5.5	Tamaño de partícula	21
3.6	Resultados experimentales.....	21
4	SELECCIÓN Y DISEÑO DEL GASIFICADOR.....	23
4.1	Selección del gasificador	23
4.2	Descripción del equipo y del proceso de gasificación.....	25
4.3	Balace de masa	27
4.3.1	Potencia de salida del gasificador	28
4.3.2	Flujo volumétrico de gas producido.....	29
4.3.3	Flujo de aire	30
4.4	Balace de energía.....	31
4.4.1	Temperatura de gasificación	31
4.5	Dimensionamiento del gasificador	32
4.5.1	Sección interna.....	32
4.5.2	Sección externa.....	34
4.5.3	Parte superior (la cubierta).....	37
4.5.4	Parte inferior (rejilla de cenizas).....	37
4.5.5	Materiales para la construcción.....	39
4.5.6	Sistemas de control.....	41
5.	EQUIPOS PARA ACONDICIONAMIENTO DEL GAS Y GENERACIÓN DE ENERGIA.....	43
5.1	Ciclón.....	44
5.2	Intercambiador de calor	49
5.3	Motor- Generador	51
5.4	Diagrama de bloques (BFD) y diagrama de flujo (PFD) del proceso de gasificación.....	51
6.	ANÁLISIS FINANCIERO	54

7. CONCLUSIONES.....	57
8. RECOMENDACIONES	59
BIBLIOGRAFÍA.....	60
ANEXOS.....	65

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Características principales de cada tipo de gasificador.	10
Tabla 2. Reacciones de la gasificación.....	11
Tabla 3. Residuos de poda generados en la universidad EAFIT mes a mes....	15
Tabla 4. Análisis elemental de los residuos de poda.	18
Tabla 5. Análisis próximo de los residuos de poda.	19
Tabla 6. Caracterización fisicoquímica de los residuos de poda de la universidad EAFIT.	22
Tabla 7. Criterios de selección del gasificador.....	23
Tabla 8. Características del gasificación tipo downdraft.	24
Tabla 9. Ventajas del gasificador tipo downdraft.....	24
Tabla 10. Moles de cada elemento que conforman los residuos.	27
Tabla 11. Parámetros necesarios para el balance de masa.	28
Tabla 12. Poder calorífico inferior de los residuos de poda.	29
Tabla 13. Oxígeno estequiométrico consumido.	30
Tabla 14. Cantidad de aire estequiométrico en el proceso de gasificación.	30
Tabla 15. Flujo de aire para el proceso de gasificación.	31
Tabla 16. Temperaturas del proceso de gasificación.....	31
Tabla 17. Medidas de la tolva en la zona de secado y alimentación.	37
Tabla 18. Propiedades físicas del acero inoxidable 310S.....	41
Tabla 19. Propiedades físicas de la lana mineral.....	41
Tabla 20. Descripción del gasificador seleccionado.	42
Tabla 21. Propiedades del gas para uso en motores y turbinas.	43
Tabla 22. Distribución de tamaño de partículas.	45
Tabla 23. Características de los ciclones de alta eficiencia.	46
Tabla 24. Datos para realizar el diseño del ciclón.....	46
Tabla 25. Dimensiones del ciclón.	47
Tabla 26. Eficiencia del ciclón.....	48
Tabla 27. Condiciones de operación y propiedades del gas de síntesis.....	49
Tabla 28. Condiciones de operación y propiedades del agua.	49
Tabla 29. Parámetros de entrada y salida motor seleccionado.	51
Tabla 30. Costo de fabricación del gasificador.	54
Tabla 31. Gastos que representa el gasificador cada mes.....	55
Tabla 32. Ingresos y egresos del proceso de gasificación.....	55
Tabla 33. Flujo de caja.....	56
Tabla 34. Valor presente neto (VPN) y tasa interna de retorno (TIR)	56

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Tipos de gasificadores.	8
Figura 2. Residuos de poda recolectados en la universidad EAFIT.	16
Figura 3. Disposición de los residuos de poda en la universidad EAFIT.	17
Figura 4. Etapas del proceso de gasificación.	27
Figura 5. Sección interna del gasificador.	32
Figura 6. Garganta en la zona de oxidación.	33
Figura 7. Sección externa del gasificador.	35
Figura 8. Sección externa con tolva en la zona de secado y alimentación.	36
Figura 9. Sección superior del gasificador.	37
Figura 10. Sección inferior del gasificador.	38
Figura 11. Equipo de gasificación completo.	39
Figura 12. Distribución material tubo interior.	40
Figura 13. Distribución material tubo exterior.	40
Figura 14. Dimensiones del gasificador.	45
Figura 15. Diagrama de bloques (BFD).	52
Figura 16. Diagrama de flujo de proceso (PFD).	53

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1. Especies de vegetación existente en la universidad EAFIT.....	65
Anexo 2. Cotización chipeadora.	66
Anexo 3. Ficha técnica fibra cerámica.	67
Anexo 4. Ficha técnica motor-generator.	68

RESUMEN

Dado que en la universidad EAFIT se produce una cantidad considerable de residuos de poda, se determinó que la gasificación es una alternativa viable para el aprovechamiento energético de este tipo de residuos.

El presente proyecto desarrolla el diseño conceptual de un gasificador de lecho fijo de corrientes paralelas (downdraft), en el cual se incluye un diagnóstico y una caracterización de los residuos de poda, una selección y diseño del gasificador, una descripción de los equipos necesarios para el acondicionamiento del gas y la generación de energía, y por último un análisis financiero de todo el proceso de gasificación.

Algunas de las características más importantes del procesos y del equipo de gasificación son las siguientes: potencia del gasificador de 74.86 kW, capacidad del gasificador de 90.36 kg, tiempo de operación de 4 horas, diámetro exterior de 0.47 m, diámetro interior de 0.268 m, diámetro de tolva de 1.33 m y altura total del gasificador de 1.219 m.

Teniendo en cuenta el costo de fabricación, la puesta en marcha del proceso de gasificación y la venta de la energía a las cafeterías de la universidad EAFIT, se obtuvo que el proyecto es viable financieramente con una TIR de 13% y un VPN de \$ 4.741.714

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Planteamiento del problema

Los residuos orgánicos que se generan en la universidad EAFIT pueden ser una alternativa para la generación de productos energéticos, debido a que se produce una cantidad de 400 kg/semanal de material orgánico, los cuales se conforman en una parte por verduras, frutas y restos de alimentos que resultan como residuos de la actividad comercial de las cafeterías y otra por residuos de poda conformado por hojas, madera y grama (Rozo, 2012). Como alternativa para aprovechar este material de poda existen varios procesos generadores de productos energéticos, los cuales pueden ser utilizados para disminuir el impacto ambiental que generan estos residuos al ser dispuestos en rellenos sanitarios (Gutiérrez Becquet, 2007).

En Antioquia la gestión de los residuos sólidos se ha enfocado principalmente en las etapas de recolección y transporte, olvidando aspectos importantes como la valorización y tratamientos de los residuos sólidos (Hoyos, Hincapié, Marín, Jiménez, & Valencia, 2013), solo algunas personas utilizan estos residuos para ser quemados y poder así disminuir la cantidad de residuos u obtener energía en forma de calor. Hoy en día con toda la normatividad existente y con la conciencia ambiental que se ha venido adquiriendo se utilizan estos residuos como insumos para abono de jardines, tierra y además para la obtención de productos energéticos.

En la universidad EAFIT se construyó una planta de compostaje, ubicada en el lote de los guayabos, con el fin de aprovechar los residuos sólidos biodegradables para la producción de abonos y fertilizantes, este proyecto fue cerrado debido a la ampliación que tuvo la universidad en este lote.

Para este proyecto se ha investigado acerca de la gasificación, que es una técnica eficiente para la transformación de los residuos de poda en productos energéticos. Dicho proceso requiere de ciertas propiedades fisicoquímicas de los residuos para que la pirólisis y la gasificación no se vean afectadas, algunas de estas son la humedad, el poder calorífico, la densidad y la composición (análisis elemental). Además se deben tener en cuenta parámetros como la temperatura y presión en las diferentes etapas del proceso ya que son indispensables para obtener buenos resultados en los productos finales (Basu, 2010).

Este proceso en un futuro será una fuente alternativa importante para la obtención de productos químicos como el amoníaco y el metano, pues se estima que alrededor de un 25% de amoníaco y un 30% de metano en el mundo se está obteniendo por medio del proceso de la gasificación (Gasification Technologies Council, s. f.). En la actualidad existen plantas que utilizan madera como materia prima para la gasificación, algunas de ellas son GoBiGas en Europa que tiene como meta la producción de 800-1000 MW de gas de síntesis, el cual servirá para reemplazar el gas natural (Energi, s. f.). Por otra parte esta Genossenkorporation Stans ubicada en suiza, esta empresa producirá 15.2 GWh de calor y 9.6 GWh de electricidad, la cual será la red de calefacción para grandes consumidores como lo son los aviones Pilatus y el ejército suizo (Energi, s. f.). La implementación de este tipo de gasificadores en diferentes partes del mundo ha demostrado ser viable a nivel económico y ambiental. Por tal motivo se piensa que la implementación de un gasificador que trabaje con residuos maderables puede resultar viable económicamente de acuerdo a las necesidades energéticas que se requieran (Gasification Technologies Council, s. f.).

Por todo lo anterior se planteará el diseño conceptual de un gasificador para analizar la cantidad de productos energéticos generados y la factibilidad financiera de su implementación.

1.2 Justificación

La energía generada a partir de biomasa representa el 11% del suministro mundial de energía primaria, y se estima que alrededor de 2 millones de personas en todo el mundo dependen de la biomasa para sus necesidades energéticas (Ratnadhariya & Channiwala, 2009). En la universidad EAFIT los principales residuos a valorizar son los residuos de poda, los cuales cuentan con un plan de manejo adecuado pero a pesar de esto no se presentan alternativas energéticas a partir de estos residuos dentro del campus. De acuerdo con el plan de manejo integral de los residuos sólidos el principal grupo de residuos para ser valorizado son los orgánicos ya que son los que representan el 90% de la producción total de desperdicios (Rozo, 2012).

La gasificación como mecanismo de reciclaje del material orgánico ayudaría a lograr las metas de aprovechamiento propuestas en el Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos Regional (definido como el conjunto de operaciones y disposiciones encaminadas a dar a los residuos producidos el destino más adecuado desde el punto de vista ambiental (“Decreto 1713 de 2002.,” 2012)) ,

el cual quiere llegar a un porcentaje de aprovechamiento del 15% de residuos orgánicos para el 2015 y 30% para los inorgánicos (Ortiz, 2013). Por lo tanto generar productos energéticos a partir de residuos orgánicos ayudaría a disminuir el volumen de residuos y aumentar la vida útil de los rellenos sanitarios.

La implementación de la gasificación como mecanismo de tratamiento del material de poda de la universidad EAFIT traerá algunos beneficios, dentro de los que se destacan.

- La disminución del volumen de residuos generados y el aumento de la vida útil de los rellenos sanitarios. Además la emisión de CO₂ generada para la obtención de energía a través de este proceso es menor que la generada con los combustibles fósiles (fuente que se está agotando debido al consumo excesivo)
- Reducción de los costos de energía, ya que con los productos de la gasificación se podrá obtener energía que ayudará a suplir un poco la demanda energética del lugar donde se implantará el gasificador. A si mismo se generará empleo ya que para el mantenimiento y funcionamiento del equipo se necesitará de personal.
- Si los resultados de este proyecto son favorables, se podrá aplicar esta tecnología no sólo a nivel universitario sino también a nivel regional para abastecer de energía los lugares del país en donde no llegue el sistema interconectado de energía eléctrica.
- Un nuevo aporte que servirá como base para las investigaciones en el campo científico y tecnológico en cuanto a la valorización de residuos orgánicos de la universidad EAFIT. Además se aplicarán los conceptos vistos durante toda la carrera en materias como balances de materia y energía, transferencia de calor, diseño en ingeniería de procesos, procesos industriales e ingeniera económica para el desarrollo de la investigación.

1.3 Preguntas de investigación

- ¿Qué tipo de características fisicoquímicas deben tener los residuos de poda para la selección del tipo de gasificador a diseñar?
- ¿Cuáles son las condiciones del proceso a las que debe operar un gasificador para una generación de gas de síntesis a partir de residuos de poda?

- ¿Qué tipo de gasificador es el apropiado para el proceso de gasificación de los residuos de poda de la universidad EAFIT?
- ¿Cuáles son las dimensiones y materiales que requiere el gasificador de acuerdo con las condiciones planteadas en el punto anterior?
- ¿Qué tan viable económicamente puede resultar la implementación de un gasificador en la universidad EAFIT?

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Diseñar conceptualmente un gasificador para la producción de gas de síntesis a partir de residuos de poda de la Universidad EAFIT.

1.4.2 Objetivos específicos

- Determinar algunas características fisicoquímicas de los residuos de poda para el proceso de gasificación.
- Seleccionar el tipo de gasificador más apropiado para la gasificación de los residuos de poda de la universidad EAFIT.
- Definir los parámetros del proceso de gasificación más importantes para el desarrollo de los balances de masa y energía.
- Evaluar aspectos teóricos como dimensionamiento, materiales y construcción para el gasificador seleccionado.
- Estimar los costos que genera la implementación del proyecto en la universidad EAFIT.

2. MARCO REFERENCIAL

2.1 Definiciones básicas

- **Biomasa**

Generalmente incluye materiales vegetales, tales como cultivos, residuos de cultivos, algas, los materiales de desecho de madera de encofrado y operaciones de explotación de árboles, residuos de construcción y demolición, residuos sólidos urbanos y lodos de depuradora (o biosólidos). La definición específica de la biomasa puede depender de las leyes o regulaciones estatales (Gasification Technologies Council, s. f.).

- **Residuos orgánicos biodegradables**

Todo tipo de residuo, originado a partir de un ser compuesto de órganos naturales (El Abedul, 2008). Estos desechos pueden recuperarse o reutilizarse en diferentes procesos que generen subproductos de valor agregado que beneficien al medio ambiente (Perez Juan , Borge David, 2010)

- **Combustible**

Combustible es toda sustancia que al reaccionar con el oxígeno se oxida desprendiendo calor para su posterior aprovechamiento. Existen varios tipos de combustibles entre los que se encuentran los residuos forestales (García San José, 2001).

- **Gas de síntesis**

Es una mezcla de gases en los que predominan el monóxido de carbono y el hidrogeno. Es utilizado como materia prima para industrias químicas y de energía. (Basu, 2010).

2.2 Proceso de la gasificación

Es un proceso termoquímico por el cual la biomasa (residuos de poda) se transforma en gas combustible de poder calorífico bajo o medio, mediante un agente gasificante en unas condiciones de operación determinadas.

La biomasa que entra en estado sólido, es sometida a la acción de calor en condiciones de defecto de aire, debido a esto se producen una serie de reacciones que producen un gas de interés energético. El gas obtenido cuando la gasificación se realiza con aire se denomina gas pobre, está formado por monóxido y dióxido de carbono, hidrogeno y metano. Las principales aplicaciones de la gasificación de biomasa se basan en la utilización de la energía térmica que genera el propio proceso de gasificación y el posterior aprovechamiento del gas producido (Energía12, 2012).

2.3 Importancia de la gasificación

Existen grandes preocupaciones en la actualidad sobre temas relacionados con la contaminación y la explotación de combustibles fósiles, debido a que son problemas que causan un daño irreparable al planeta, por esta razón el hombre se ha focalizado en estos últimos años en buscar nuevas fuentes de generación de energías, encontrando opciones en fuentes como el aire, el agua, el sol y la biomasa (residuos orgánicos) para obtenerla. Estas fuentes al ser renovables, son una opción para la investigación de métodos que permitan la obtención de energía por medio de su explotación.

La biomasa en especial se perfila como uno de los recursos energéticos renovables con mayor potencial, derivando varias ventajas sociales y ambientales, siempre y cuando las políticas bioenergéticas se desarrollen desde una visión sostenible acompañada de una política de producción más limpia para establecer así un aprovechamiento adecuado de los residuos sólidos. (Restrepo, 2009).

Para el aprovechamiento de la biomasa se ha estudiado el proceso de la gasificación para la producción de energía, encontrando en este una alternativa de tratamiento que ayuda a mitigar factores ambientales como la emisión de gases efecto invernadero y la reducción en la utilización de combustibles fósiles. A través de este proceso se obtienen productos gaseosos que generan calor o electricidad por medio de la quema de estos (Demirbas & Demirbas, 2007). Sin embargo, el principal propósito de la gasificación de la biomasa es la producción de gas de poder calorífico bajo o medio que puede utilizarse como combustible en motores para la producción de energía.

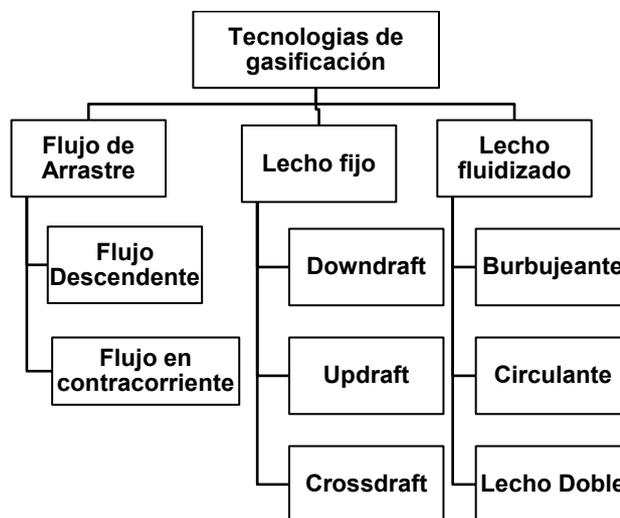
Esta tecnología a nivel comercial se ha venido desarrollando a gran escala desde 1930, con la construcción de un gasificador de lecho fijo de fabricación alemana denominado Lurgi. La mayor cantidad de este tipo de gasificadores

está en Sudáfrica, con 97 unidades en SASOL (Perales Lorente, 2002), la cual es una de las compañías internacionales más grandes de energía y productos químicos.

2.4 Especificaciones técnicas

2.4.1 Tipos de gasificadores

Figura 1. Tipos de gasificadores.



- **Flujo de arrastre**

En los gasificadores de flujo de arrastre se da una reacción casi instantánea debido a las altas temperaturas de reacción, las cuales están alrededor de los 1200°C, lo que genera altas velocidades de reacción y consiga baja concentración de alquitranes en el gas generado. La alimentación se realiza en la misma dirección del vapor y el agente oxidante. Algunos gasificadores que emplean esta tecnología son: Koppers-Totzek gasifier, Seimens SFG gasifier, E-gas gasifier, MHI gasifier, EAGLE gasifier (Castells & García, 2012).

- **Lecho fijo**

Este tipo de gasificadores poseen una tecnología simple y fácil de operar, su alimentación puede ser de forma continua o por lotes. Este proceso necesita de

la ayuda de agentes gasificantes como lo son el vapor de agua, Oxígeno o aire, los cuales son introducidos por la parte interior en contracorriente con el material alimentado por la cabeza del gasificador. (Castells & García, 2012).

Existen tres tipos de gasificadores de lecho fijo los cuales se clasifican dependiendo de la dirección del flujo, estos son: Downdraft (corriente paralela), Updraft (contracorriente) y Crossdraft (corriente cruzada).

Downdraft (corriente paralela): en este equipo la alimentación de los residuos se realiza por la parte superior mientras que el agente gasificante se introduce a cierta altura por encima de la zona de oxidación. El gas de síntesis sale por la parte inferior al igual que las cenizas (Basu, 2010).

Updraft (contracorriente): el agente gasificante en este equipo se introduce por la parte inferior del gasificador mientras que los residuos se alimentan por la parte superior, creando así un flujo en contracorriente. El gas producido sale por la parte superior (Basu, 2010).

Crossdraft (corriente cruzada): la alimentación de los residuos se realiza por la parte superior del gasificador y el agente gasificante se inyecta por un lado del equipo directo a la zona de oxidación. El proceso de gasificación en este equipo se genera de forma concéntrica, haciendo que el gas de síntesis salga por la parte opuesta por donde se inyecta el agente gasificante (Basu, 2010).

La diferencia entre estos tres gasificadores se basa en la calidad del producto obtenido, pues en el Downdraft se obtiene un producto con un bajo contenido de alquitranes, mientras que el Updraft presenta un gas con un alto contenido de este, debido a que no alcanzan a pasar por la zona de pirólisis para ser descompuestos, para el gasificador Crossdraft se presenta una alta temperatura de salida del gas lo que puede ser una desventaja para su manejo y además contiene una alta cantidad de cenizas en los gases de combustión (Rincon Sonia, 2011).

- **Lecho fluidizado**

La alimentación del material se realiza por la parte superior del gasificador y el agente gasificante se introduce por la parte inferior, el material alimentado debe ser muy fino para facilitar el contacto completo entre ambas fases. Presenta una alta velocidad de reacción y un bajo tiempo de residencia de los sólidos, presenta una desventaja y es que contiene un alto contenido de polvo en la fase gaseosa. El producto gaseoso obtenido de este proceso presenta una cantidad media de alquitranes. Existen tres tipos de gasificadores los cuales

son los de lecho fluidizado burbujeante y los de lecho fluidizado circulante, y los de lecho fluidizado presurizados (cama doble) (Castells & García, 2012).

En la Tabla 1 se pueden observar los diferentes tipos de gasificadores y su relación en cuanto a capacidad y temperatura de operación, identificando que para los gasificadores de lecho fijo se manejan capacidades más bajas en comparación con los otros dos tipos de gasificadores.

Tabla 1. Características principales de cada tipo de gasificador.

Tipo de gasificador	Característica	
	Capacidad máxima (t/h)	Temperatura de operación °C
Lecho fijo		
Downdraft	0.5	1000
Crossdraft	1	900
Updraft	10	1000
Lecho fluidizado		
Lecho f. doble	10	800
Lecho f. ciculante	20	850
Lecho f. burbujeante	20	1000
Flujo de arrastre	38	1200

Fuente: (Castells & García, 2012) y (Lee, 2006)

2.4.2 Etapas internas del proceso de gasificación

- **Secado**

Primera etapa donde se evapora el agua que contiene el material, es una etapa fundamental debido a que se debe tener un bajo porcentaje de humedad para que ocurra la reacción de manera óptima (Reed & Das, 1988).

- **Pirólisis**

Etapa de calentamiento de la biomasa en ausencia de aire, se puede realizar una combustión parcial o total del material. Los productos de la pirólisis son gases, vapores, líquidos y cenizas. La composición de estos productos depende de la temperatura, del tipo de biomasa y del proceso en sí (Gonzales Velasco, 2009).

- **Oxidación**

Esta etapa tiene lugar cuando se incorpora un agente gasificante por lo general aire al sistema para obtener la energía suficiente para las reacciones de pirólisis y de reducción (Ruiz, Juárez, Morales, Muñoz, & Mendívil, 2013). La oxidación parcial de los productos de la combustión produce el monóxido de carbono, el cual es un componente deseado en la gasificación debido a sus múltiples aplicaciones, en particular la producción de combustibles sintéticos. (Abughazaleh et al., 2007).

- **Reducción**

Es el proceso que convierte mediante oxidación parcial a temperaturas elevadas la biomasa en gas de moderado poder calorífico (gas de síntesis) conformado principalmente por CO, CH₄ y H₂ (Gonzales Velasco, 2009).

2.4.3 Reacciones presentes en la gasificación

En cada etapa de la gasificación se presentan una serie de reacciones que generan compuestos que conforman el gas de síntesis, estas reacciones se pueden apreciar en la Tabla 2.

Tabla 2. Reacciones de la gasificación.

Proceso	Reacción
Combustión	$C + O_2 \rightarrow CO_2$
	$C + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow CO$
Gasificación	$C + O_2 \rightarrow CO_2$
	$C + 2H_2 \rightarrow CH_4$
	$C + H_2O \rightarrow CO + H_2$
Shift (formación de hidrógeno)	$CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2$
Metanización	$CO + 3H_2 \rightarrow CH_4 + H_2O$

Fuente:(Ruiz et al., 2013)

2.4.4 Parámetros importantes para el diseño

- **Tiempo de residencia**

El tiempo de residencia de cada reactor, es el periodo en el cual las partículas de residuo carbonoso (char) permanecen en el gasificador, su residencia debe ser lo suficientemente larga para asegurar que todas las reacciones en el proceso de gasificación tengan lugar de manera satisfactoria. Los reactores que presentan los tiempos de residencia más largos son los de lecho fijo, mientras que los de lecho fluidizado tienen tiempos de residencia cortos, 1-2 segundos aproximadamente, durante el cual las pequeñas partículas de biomasa se secan, se pirolizan y luego se gasifican. Un tiempo óptimo de 1.6 segundos se propone para este tipo de gasificador (Ruiz et al., 2013).

- **Agente gasificante**

El aire es uno de los agentes gasificantes más utilizado, debido a su economía y a la producción de gas de síntesis de menor poder calorífico, debido al alto contenido de N_2 . El Vapor en cambio produce un gas de síntesis con un poder calorífico medio, y sus costos están en promedio con respecto al del aire y el oxígeno. El oxígeno es el gasificante que se utiliza para aplicaciones más avanzadas, y es también el más costoso (Ruiz et al., 2013).

- **Relación equivalente (ER)**

Es un parámetro de diseño importante para el gasificador. Es la relación entre el aire-combustible para el proceso real y el aire-combustible para la combustión completa. La relación aire-combustible se considera que tiene la mayor influencia en el poder calorífico del gas de síntesis generado (Ruiz et al., 2013).

- **Temperatura de gasificación**

La temperatura de reacción es uno de los parámetros más importantes, por lo que necesita ser controlado con precisión. El mal control de la temperatura puede disminuir la eficiencia del proceso, pues puede producir una mayor cantidad de alquitranes en el gas de síntesis. Además si la temperatura aumenta considerablemente (lecho fijo: $> 1200^{\circ}C$ y lecho fluidizado: $> 1000^{\circ}C$), puede haber problemas de acumulación, erosión y corrosión en el equipo (Ruiz et al., 2013).

- **Presión**

Dependiendo de la presión utilizada, hay dos tipos de proceso de gasificación: a presión atmosférica o presurizada (a presiones altas). Este último es más eficiente, aunque también implicaría altos costos de inversión. El gas obtenido a presiones altas sirve para un uso posterior en equipos de conversión tales como motores o turbinas (Ruiz et al., 2013).

Un aumento en la presión de funcionamiento de los gasificadores reduce la cantidad de carbón y alquitrán en el gas de síntesis generado. (Ruiz et al., 2013).

- **Dimensionamiento del equipo**

El dimensionamiento del equipo se realiza teniendo en cuenta algunas variables como la potencia salida del gas, el flujo volumétrico del gas y la cantidad de combustible alimentada. Al tener todas las medidas del gasificador se establece la capacidad del equipo, el tiempo de operación y los materiales en los que debe ser construido. Existen algunos autores entre los que se destaca Thomas B. Reed con su libro "handbook of biomass downdraft gasifier engine systems" en el cual se establece valores para algunas partes como lo es la garganta en el gasificador de corrientes paralelas (downdraft).

2.5 Aplicaciones de la gasificación

Las principales aplicaciones de la gasificación se basan en la utilización de la energía térmica que genera el propio proceso y la del gas producido:

- **Producción de calor para usos industriales**

En este caso se aprovecharía la energía térmica generada durante la gasificación y la obtenida por la combustión del gas. El sistema constaría básicamente de gasificador y quemador.

- **Producción de electricidad**

El sistema consta de un gasificador y un motor-generador. En este caso es muy importante señalar que por cada kW eléctrico generado se obtienen 2 kW

térmicos que en caso de aprovecharse harían mucho más rentable la instalación.

El gas puede sustituir a otros combustibles convencionales como el gas-oil, el fuel-oil o el gas natural y es mucho más económico, limpio y no presenta problemas de contaminación. La gasificación de biomasa puede solucionar problemas tan trascendentales como son el alto costo de la energía y de la gestión de desperdicios (Arroyo, 2011).

- **Biocombustibles**

El gas de síntesis sirve como materia prima para la elaboración de biocombustibles que tienen gran demanda por los beneficios ambientales que conlleva su uso, por tal motivo se ve la oportunidad de proporcionar una más amplia gama de combustibles más limpios al ambiente. El metanol uno de los hidrocarburos de mayor generación por medio del gas de síntesis, es utilizado como potenciadores en el octanaje en los combustibles de automoción (Machado, 2010).

3 DIAGNÓSTICO Y CARACTERIZACIÓN DE LOS RESIDUOS DE PODA DE LA UNIVERSIDAD EAFIT

3.1 Descripción y manejo de los residuos de poda

La universidad EAFIT cuenta con una gran diversidad de especies de árboles entre los cuales se encuentran algarrobos, almendros, guayacanes, guayabos, pino canadiense, pimientos, mangos y nísperos. Estos tipos de árboles se encuentran plantados en un área total 40720.78 m³. Con el fin de tener un cuidado adecuado de toda la plantación de la universidad, cada 2 o 4 meses se podan, dependiendo del tipo de especie, diariamente se realiza una recolección de residuos generados por efectos del ambiente (ver Figura 2) y esta cantidad se registra mes a mes, de donde se analiza que para un solo viaje en una volqueta de 8 m³ se cargan aproximadamente 1220 kg de residuos (EAFIT, 2014). Los datos de las cantidades de residuos que se generan cada mes se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Residuos de poda generados en la universidad EAFIT mes a mes.

Mes	Viajes	Peso (kg)
Enero	11	13420
Febrero	8	9760
Marzo	8	9760
Abril	10	12200
Mayo	7	8540
Junio	6	7320
Julio	8	9760
Agosto	13	15860
Septiembre	9	10980

Por medio de la información suministrada en la Tabla 3 se determinó el flujo de masa de residuos de poda. Parámetro importante para la realización de los balances de masa y energía. Para su obtención se sacó un promedio de la cantidad producida mes a mes y se obtuvo un valor en horas de 22.59 kg (residuos)/h.

Figura 2. Residuos de poda recolectados en la universidad EAFIT.



La universidad cuenta con un lugar específico donde se recolectan estos residuos antes de ser entregados a un tercero, para esto se disponen de tres contenedores especiales ubicados en los parqueaderos contiguos a la quebrada, los cuales se pueden observar en la Figura 3. Anteriormente este tipo de residuos después de su recolección se disponían en la compostera de la universidad, situada en el lote de los guayabos; debido a los proyectos que la universidad tiene de ampliación de sus instalaciones se decidió eliminar la compostera para uso de este espacio, por consiguiente la universidad realizó un convenio con un tercero para la disposición final de este tipo de residuos. Para tener así beneficios, éste se encarga de distribuir los residuos maderables a empresas que los utilicen en sus procesos.

El valor que se tiene para la gestión de estos residuos se basa en el transporte de estos hacia las diferentes fuentes de aprovechamiento, teniendo un precio de \$23,000 pesos/m³. Adicionalmente los costos que devengan las 20 personas encargadas de la poda y mantenimiento de las zonas verdes, las cuales trabajan para la empresa bosque urbano (EAFIT, 2014).

Figura 3. Disposición de los residuos de poda en la universidad EAFIT.



3.2 Clasificación de la madera

Químicamente la madera es heterogénea, formada esencialmente de celulosa, polisacáridos y lignina. Dentro de la universidad EAFIT hay una gran variedad de árboles que poseen diferentes tipos de maderas, es posible clasificar los tipos maderas recolectadas en:

- **Madera de coníferas o blanda:** caracteriza por tener gran resistencia, por ser ligera, blanda y por la facilidad en su tratamiento, dentro de esta clasificación los arboles presentes en la universidad son; el pino canadiense y los pimientos, de los cuales resultan residuos por las actividades de poda que se realizan constantemente como tratamiento de la vegetación (Gutiérrez Becquet, 2007).
- **Madera de frondosas duras:** de gran dureza y considerable resistencia a la compresión, aun en sentido normal a las fibras. Debido al peso que tienen se asegura un correcto rendimiento en los procesos de transformación química. Dentro de la universidad se encuentran algarrobos, almendros (Gutiérrez Becquet, 2007).

3.3 Propiedades químicas de los residuos de poda

Las propiedades químicas de la madera se determinan por medio de un análisis elemental, el cual muestra las fracciones en masa de los compuestos presentes en los residuos de poda maderables tales como: carbono, hidrógeno, nitrógeno, azufre, y oxígeno. Estas fracciones son necesarias para realizar el balance de masa de la materia a utilizar, debido a que influyen en la proporción agente gasificante/combustible, además de delimitar la producción de contaminantes del tipo de óxidos de nitrógeno y/o azufre. Los porcentajes fueron tomados de la literatura para residuos maderables similares a los residuos de la universidad EAFIT, y se pueden apreciar en la Tabla 4.

Tabla 4. Análisis elemental de los residuos de poda.

Análisis elemental					
Muestra	N	C	H	S	O
% masa	0.5	51.4	6.1	0.08	41.9

Nota: Datos en base seca y libre de cenizas. Fuente: (Vassilev, Baxter, Andersen, & Vassileva, 2010).

Algunos elementos de los residuos de poda como el nitrógeno, azufre y cloro al ser utilizados como fuentes de energía, pueden generar emisiones perjudiciales al medio ambiente. Entre mayor sea la presencia de estos elementos en el combustible mayor será su nivel de emisiones al medio ambiente (Francescato, Valter; Zuccoli Bergomi, 2008). A continuación se hablará de cada componente y el efecto que éste tiene sobre el medio ambiente.

- **Azufre y cloro:** se presenta en cantidades bastante pequeñas menores al 1% en los combustibles sólidos y cuando se transforman en H_2S y HCL pueden ayudar a la formación de la lluvia ácida (Huaraz Choi, 2013). El HCL con ayuda de otros compuestos puede presentar efectos corrosivos en las piezas metalizas internas del equipo (Francescato, Valter; Zuccoli Bergomi, 2008).
- **Nitrógeno:** se encuentra en pocas cantidades cuando se utiliza combustibles como la madera; su impacto se presenta en la formación de óxidos de nitrógeno, que contribuyen a la formación de la lluvia ácida. En la gasificación se presenta menos emisiones de NOX en comparación con los procesos de combustión (Huaraz Choi, 2013).

3.4 Punto de fusión de las cenizas de los residuos de poda

El punto de fusión de las cenizas de poda que es una madera que presenta corteza es relativamente alto entre 1300-1400°C. Cuando no se maneja una temperatura de fusión de las cenizas correcta se pueden generar escorias en la parrilla, lo que puede traer el sobrecalentamiento de la parrilla y a su vez su corrosión (Francescato, Valter; Zuccoli Bergomi, 2008).

3.5 Propiedades físicas de los residuos de poda

3.5.1 Análisis próximo

Este tipo de análisis nos muestra la fracción en peso del contenido en cenizas, material volátil y carbono fijo. El material volátil representa el que abandona el sólido durante el proceso de pirólisis (800°C). El carbono fijo y las cenizas serían el sólido residual. El contenido en cenizas indica la cantidad de sólidos que será necesario retirar del gasificador por unidad de masa procesada, siendo deseable no sobrepasar un contenido del 10% en base seca. Estas cenizas se deben retirar del gasificador para evitar su acumulación. En la

Tabla 5 se muestran las fracciones en peso, el carbono fijo, cenizas y material volátil. Correspondientes a las muestras de residuos orgánicos en base seca (materiales de poda) que se obtuvieron de la teoría (Vassilev et al., 2010).

Tabla 5. Análisis próximo de los residuos de poda.

Parámetro	Unidad	valor
Volátiles	% peso	78.0
Carbono fijo	% peso	16.6
Cenizas	% peso	5.4

Nota: Datos en Base seca. Fuente: (Vassilev et al., 2010).

3.5.2 Humedad

El contenido de humedad es la cantidad de agua que posee los residuos de poda, representado en porcentaje del peso del material (Huaraz Choi, 2013).

La cantidad de humedad que contienen los residuos de poda pueden afectar la eficiencia térmica, puesto que un alto contenido de humedad reduce la eficiencia, debido a que, el calor que se emplea para evaporar el agua es mayor, y como consecuencia, la energía térmica no se transforma en energía química del gas. Por lo tanto, se obtienen unos valores caloríficos bajos del gas. Además de esto, un alto contenido de humedad da lugar también a valores caloríficos del gas bajos, lo cual causa unas bajas temperaturas en la zona de oxidación que puede ocasionar un aumento en la generación de alquitranes que afectan el proceso, volviendo el gas impuro, si el gas se emplea para motores. Por este motivo es importante trabajar con residuos maderables con bajo porcentaje de humedad (García Mosqueda, 2013). Es recomendable trabajar con porcentajes de humedad entre 10 y 20 % para un proceso de gasificación sin problemas.

3.5.3 Poder calorífico

Representa la cantidad de energía liberada por unidad de combustible cuando se presenta una reacción química de combustión.

El grado de humedad influye en gran medida sobre el poder calorífico, pues a mayores porcentajes de humedad menor será el valor del poder calorífico. Por tal motivo se seleccionaron residuos forestales maderables secos para obtener un poder calorífico más alto. Para que la madera pueda rendir al máximo como combustible, es necesario que este seca o con un bajo contenido de humedad.

3.5.4 Densidad bulk

La densidad aparente es la capacidad de compactación de un material cuando se vierte en un recipiente. Es un parámetro de gran importancia en el proceso de la gasificación, pues a mayor densidad bulk y aparente del combustible, mayor será la cantidad de energía generada por volumen. Además tiene una gran influencia en la calidad del gas generado, debido a que de él depende el tiempo de residencia en la zona de oxidación (Huaraz Choi, 2013).

3.5.5 Tamaño de partícula

El tamaño de partícula de los residuos de poda es un parámetro importante debido a que estos definen el comportamiento de la biomasa dentro del gasificador (Huaraz Choi, 2013). Las recomendaciones para el proceso de la gasificación, son tamaños de partículas en un rango de 1mm a 15 cm (dependen del tipo de gasificador), con composición homogénea para que el combustible reaccione de forma adecuada y permita aumentar la calidad del gas de síntesis. Sin embargo no debe ser un tamaño excesivamente pequeño, pues puede ocasionar grandes caídas de presión sobre la zona de reducción, lo que podría generar a su vez bajas temperaturas y producción de alquitranes (FAO, 1993).

Para este proyecto se define el tamaño de partícula de acuerdo a las especificaciones de la Chipeadora con la cual se reduce el tamaño de los residuos de poda a un diámetro de partícula de aproximadamente 3 a 7 cm.

3.6 Resultados experimentales

Los resultados de las propiedades físicas de los residuos de poda maderables fueron obtenidos a partir de una serie de pruebas, de humedad, densidad bulk y poder calorífico realizadas en el laboratorio de la universidad EAFIT en conformidad con las normas y procedimientos respectivos de cada prueba. A cada una de las propiedades medidas se le realizaron tres ensayos para tener mayor exactitud en los datos, tomando después un promedio de cada uno.

Para la medición del contenido de humedad se tomó una muestra de 300 g, la cual fue pre-secada y llevada al horno durante 1 hora hasta llegar a un peso constante (BS EN ISO 18134-3), luego con los residuos previamente sometidos al proceso de secado, se mide el poder calorífico, en donde se siguieron los pasos del manual de laboratorio de la universidad EAFIT, este procedimiento se llevó cabo mediante el empleo de una bomba calorimétrica, a una temperatura de referencia 25°C y presión constante Oxígeno («Solid biofuels — Determination of calorific value», 2009).

La medición de densidad bulk se determinó utilizando un recipiente con un volumen conocido y con el material previamente astillado siguiendo la norma CEN/TS 15401:2010.

A continuación se presentan en la Tabla 6 cada uno de los resultados obtenidos para las propiedades medidas experimentalmente.

Tabla 6. Caracterización fisicoquímica de los residuos de poda de la universidad EAFIT.

Parámetro	Símbolo	Unidades	Valor	Norma
Contenido de humedad	M	%	26.175	BS EN ISO 18134-3
Poder calorífico superior	PCS	kJ/kg	18.399	Manual de laboratorio de la universidad EAFIT
Densidad bulk	$\rho_{residuos}$	kg/m ³	262.90	CEN/TS 15401:2010

4 SELECCIÓN Y DISEÑO DEL GASIFICADOR

4.1 Selección del gasificador

- **Criterios de la selección de gasificador**

Para la selección del gasificador se realizó un estudio de los requerimientos y las ventajas de cada uno de los diferentes tipos de gasificadores. A continuación se muestra el procedimiento para la selección del gasificador, en donde se dio una calificación a cada condición de 4 a 1, siendo 4 la mejor calificación y 1 la menos favorable. Se compararon tres tipos de gasificadores: downdraft, updraft y crossdraft.

Tabla 7. Criterios de selección del gasificador.

	Gasificadores		
	Downdraft	Updraft	Crossdraft
Mayor potencia	4	3	3
Menor capacidad	4	3	2
Fabricación y construcción	4	3	3
Retiro de cenizas	3	3	3
Mantenimiento	3	3	3
Operatividad	4	3	3
Cantidad de alquitranes	4	2	3
Tamaño de partículas	3	4	3
Eficiencia y costos	3	3	3
Total	32	27	26

El gasificador más adecuado para el proceso de gasificación de residuos de poda es el de corrientes paralelas (Downdraft), debido a que obtuvo la mayor puntuación como se puede observar en la

Tabla 7.

Este equipo es el indicado, pues es un equipo a pequeña escala (cantidades pequeñas de combustible), económico en su construcción y presenta un gas de síntesis con una poca cantidad de alquitranes, por tales razones se acomoda a nuestras necesidades. A continuación se presentan en más detalle las

condiciones de operación (Tabla 8) y las ventajas del gasificador downdraft (Tabla 9).

Tabla 8. Características del gasificación tipo downdraft.

Características	Valor
Humedad	10-20%
Tamaño partícula	2-20 cm
Contenido de cenizas	5 %
Temperatura de salida del gas	Baja
Capacidad máxima	350 kW

Fuente: (Stassen & Knoef, 1980)

Tabla 9. Ventajas del gasificador tipo downdraft.

Ventaja	Descripción
Diseño y característica técnicas	Son los equipos más simples y adecuados para aplicaciones a pequeña escala. (Liu, Chang, & Kuo, 2008)
Experiencia	Existen países en Europa, India y Estados Unidos que han desarrollado gasificadores downdraft para diversos tipos de biomasa
Características de los residuos	Pueden operar con materiales que tengan un tamaño uniforme y homogéneo en sus partículas, un contenido de humedad y cenizas de menos de 20% y 5% respectivamente (Chopra & Jain, 2007).
Calidad de los productos	Bajo contenido de alquitranes debido a que el gas debe pasar por temperatura muy altas en la zona de oxidación, lo que genera la descomposición de alquitranes(Fernández, 2011).
Tratamientos posteriores al producto obtenido	Ha demostrado ser el diseño más exitoso para equipos de potencia pues no requiere limpieza de los productos obtenidos.
Eficiencia energética	Presenta alta eficiencia térmica

4.2 Descripción del equipo y del proceso de gasificación

El gasificador downdraft es un equipo que se caracteriza por tener una corriente paralela entre el combustible y el agente gasificante, en donde la alimentación del combustible se realiza por la parte superior del gasificador y el agente gasificante, por unas boquillas ubicadas a cierta altura de la zona de oxidación. En dicha zona se encuentra la garganta, la cual es la encargada de mantener las altas temperaturas para garantizar las reacciones secundarias que permitan la eliminación de los alquitranes. La salida del gas obtenido se realiza por la parte inferior del reactor, lo que caracteriza a este equipo como un reactor de corriente descendiente (Fernández, 2011).

El proceso de gasificación está dividido en 4 etapas (Ver Figura 4). La primera se denominada **secado**, la cual recibe el combustible (los residuos de poda) que son introducidos desde la parte superior para la eliminación de la humedad. Esta humedad como se ha dicho anteriormente debe tener valores entre el 10% y 20%. Sin embargo, si se presentan humedades superiores a 20% existe la posibilidad de secar los residuos al aire libre antes del proceso, lo que puede disminuir la humedad hasta el 10% (Pérez-Bayer, 2009)

La segunda etapa es la **pirólisis**, en donde ocurre la liberación de volátiles de la biomasa. En esta etapa es importante el tiempo de residencia del material debido a que si no ocurre de manera completa la combustión el producto va estar contaminado de alquitranes. Existen otras variables importantes en este proceso de pirólisis las cuales son:

- **Tamaño de partícula:** características como la composición, el tamaño, la forma, y la estructura física de los residuos influyen en el producto de la pirólisis a través de su efecto sobre la velocidad de calentamiento. Partículas pequeñas ofrecen menos resistencia al escape de gases no condensables, por lo que, no pueden escapar de manera fácil a los alrededores antes de someterse a reacciones secundarias (Basu, 2010) Estas partículas de tamaño pequeño presentan una gran desventaja y es que pueden llevar a que se produzcan grandes caídas de presiones en el gasificador (Fernández, 2011).
- **Efecto de la temperatura:** una partícula de combustible se calienta a una velocidad definida a partir de la temperatura ambiente hasta una temperatura máxima, conocida como la temperatura de pirólisis. Las bajas

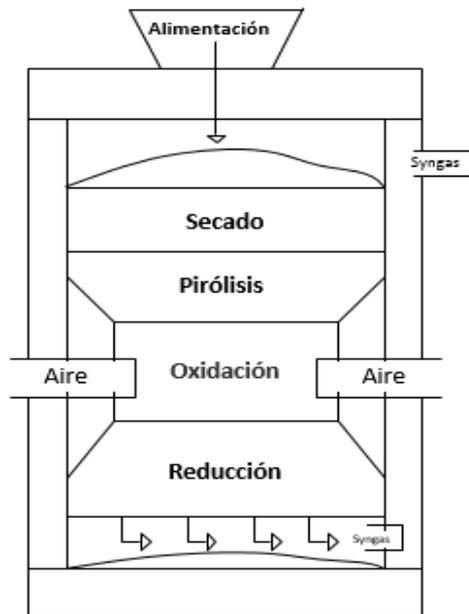
temperaturas pueden producir más cenizas, mientras que las temperaturas altas producen menos cantidad (Basu, 2010).

- **Efecto tasa de calentamiento:** los parámetros de funcionamiento de un pirolizador se ajustan para cumplir con el requisito del producto final de interés. Normas de diseño provisionales para la calefacción en un pirolizador incluyen que para maximizar la producción de gas, utilizar una velocidad de calentamiento lento y un tiempo de residencia del gas largo (Basu, 2010).

La tercera y cuarta etapa son la **oxidación y reducción** respectivamente, en donde por medio del agente gasificante se producen las reacciones de oxidación y la generación del gas de síntesis. Los factores que influyen en estas etapas son:

- **Temperatura:** algunas experimentaciones han demostrado que altas temperaturas (800-1400°C) favorecen las reacciones dentro del gasificador, aunque cabe resaltar que temperaturas muy altas pueden causar aglomeración y sinterización de las cenizas, lo que conlleva a la disminución drástica de gas producido (Rincón, Gómez, & Klose, 2011).
- **Agente gasificante:** en la gasificación el agente más utilizado para el proceso de oxidación es el aire, debido a su economía y fácil disposición. El poder calorífico del gas obtenido con este agente es aproximadamente 3 a 6 MJ/Nm³ debido al contenido de nitrógeno (Rincón et al., 2011). El aire que ingresa debe ser precalentado para mantener las temperaturas y la eficiencia del proceso.
- **Tiempo de residencia:** deben ser periodos largos para asegurar que todas las reacciones del proceso se lleven a cabo de manera satisfactoria, generando el gas de síntesis con la composición adecuada, Es decir, al tener un tiempo de residencia alto se reduce el material sólido y se produce la eliminación de los alquitranes resultado de las reacciones secundarias (Fernández, 2011). Un tiempo óptimo para los gasificadores de lecho fijo es de 1.6 segundos (Ruiz et al., 2013).

Figura 4. Etapas del proceso de gasificación.



Fuente: Adaptación de (Reed & Das, 1988).

4.3 Balance de masa

Basándose en datos de entrada como la composición fisicoquímica y el flujo de los residuos de poda se realizaron los balances de masa para encontrar las variables de potencia de salida de los residuos, el flujo volumétrico de gas y el flujo de aire real.

Tabla 10. Moles de cada elemento que conforman los residuos.

Elemento	% Másico	Moles
Carbono	51.4	4.283
Hidrógeno	6.1	6.100
Nitrógeno	0.5	0.036
Oxígeno	41.9	2.619
Azufre	0.08	0.003
Total	99.98	13.040

Nota: los porcentajes se encuentran en base seca y libre de cenizas. Tomado de (Vassilev et al., 2010).

Tabla 11. Parámetros necesarios para el balance de masa.

Nombre	Símbolo	Unidad	Valor	Referencia
Flujo de combustible	M_f	kg/h	22.593	Pag 15
Poder calorífico inferior de la biomasa	PCI_{bm}	kJ/kg	18.399	Tabla 6
Eficiencia de la gasificación	η_g	%	60	(FAO, 1993)
Poder calorífico inferior gas	LHV_g	kJ/kg	6100	(Reed & Das, 1988)

4.3.1 Potencia de salida del gasificador

Para encontrar la potencia de salida de los residuos se empleó la Ecuación 1, la cual relaciona los términos de potencia, eficiencia del gasificador y poder calorífico inferior de la biomasa utilizada (PCI_{bm}) (Basu, 2010).

$$M_f = \frac{Q}{PCI_{bm} * \eta_g}$$

Ecuación 1

Para hallar el poder calorífico inferior de la biomasa se emplea la Ecuación 2 en donde se utiliza el poder calorífico superior libre de cenizas, el hidrogeno y porcentaje de humedad de los residuos utilizados para su obtención. Para hallar el poder calorífico superior libre de cenizas necesario en la Ecuación 2 se utiliza la Ecuación 3.

$$PCI_{bm} = PCS_{sc} - 20,300 * H_{sc} - 2,26 * M_{sc}$$

Ecuación 2

$$PCS_{sc} = PCS * \left(\frac{1 - M}{1 - Cénias - M} \right)$$

Ecuación 3

En donde PCS_{sc} es el poder calorífico superior libre de cenizas, H_{sc} es la fracción másica de hidrogeno libre de cenizas, M es la humedad libre de cenizas y PCS es el poder calorífico en base seca.

A continuación se muestra el valor obtenido para el Poder calorífico inferior de la biomasa obtenido por medio de la aplicación de las ecuaciones nombradas anteriormente.

Tabla 12. Poder calorífico inferior de los residuos de poda.

Termino	Símbolo	Unidades	Valor
Poder calorífico superior sin cenizas	PCS_{sc}	kJ/kg	19.881
Poder calorífico inferior de la biomasa	PCI_{bm}	kJ/kg	19.879

Al despejar la potencia Q de la Ecuación 1 se obtuvo como resultado 74.86 kW.

4.3.2 Flujo volumétrico de gas producido

El flujo de gas producido es un parámetro de entrada de gran importancia debido a que con este valor se puede estimar la cantidad necesaria de combustible a alimentar para obtener el volumen de gas estimado y a su vez para calcular la cantidad del agente gasificante a utilizar. De la siguiente ecuación se despeja (Basu, 2010). En donde V_g representa el flujo volumétrico del gas y PCI_g el poder calorífico inferior del gas.

$$V_g = \frac{Q}{PCI_g} = \frac{Nm^3}{h}$$

Ecuación 4

Con la potencia despejada anteriormente y asumiendo un poder calorífico inferior del gas (PCI_g) de 6100 KJ/m³ (Reed & Das, 1988), se obtuvo un flujo volumétrico del gas (V_g) de 44.177 Nm³/h. El valor del poder calorífico se asumió debido a que no se tiene información sobre la composición de salida del gas de síntesis para poder hallarlo experimentalmente.

4.3.3 Flujo de aire

Para encontrar el flujo de aire que ingresa al proceso de gasificación se debe hallar la cantidad de oxígeno estequiométrico que se consume en la combustión completa, se puede observar la cantidad en la Tabla 13.

Tabla 13. Oxígeno estequiométrico consumido.

Reacciones	Moles totales de O
$S + O_2 \rightarrow SO_2$	0.003
$C + O_2 \rightarrow CO_2$	4.283
$CO + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow CO_2$	2.142
$H_2 + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow H_2O$	3.050
$N + O_2 \rightarrow NO_2$	0.036
O	2.619
Total	6.894

Después de tener la cantidad de oxígeno de la combustión se prosigue a encontrar la masa de aire estequiométrica, teniendo en cuenta que el aire presenta una concentración aproximada de 21% de O_2 y 79% de N_2 .

Tabla 14. Cantidad de aire estequiométrico en el proceso de gasificación.

Parámetro	Unidad	Valor
Moles de O estequiométrico	kmoles	6.894
Moles O_2 estequiométrico	kmoles	3.447
Moles de aire estequiométrico	kmoles	16.415
Masa de aire estequiométrico	kg	473.420

La relación equivalente ER es un parámetro de diseño importante para el gasificador. Es la relación entre el aire-combustible para el proceso actual y el aire-combustible para la combustión completa. Este término se utiliza generalmente para situaciones de aire deficientes, tales como las que se encuentran en un gasificador. La relación de equivalencia, ER, predice el rendimiento de la gasificación, pues la calidad del gas obtenido depende en una parte del valor ER, que debe ser significativamente por debajo de 1,0 para asegurar la gasificación del combustible. Para gasificadores Downdraft se tiene que el mejor rendimiento se presenta con un ER igual a 0,25 (Basu, 2010).

$$ER = \frac{\text{rata (aire-comb (real))}}{\text{rata (aire-comb (estequimetrico))}}$$

Ecuación 5

Asumiendo el ER como 0,25 y teniendo los datos de flujo de combustible y masa de aire estequiométrica se obtuvo el flujo de aire necesario para el proceso de gasificación.

Tabla 15. Flujo de aire para el proceso de gasificación.

Parámetro	Unidades	Valor
Ralación equivalente ER	----	0.250
Rata (aire- comb(estequiométrico))	kg _{aire} /kg _{comb}	4.734
Rata (aire-comb (real))	kg _{aire} /kg _{comb}	1.184
Flujo de aire estequiométrico	kg _{aire} /h	106.958
Flujo de aire real	kg_{aire}/h	26.739

4.4 Balance de energía

4.4.1 Temperatura de gasificación

La temperatura de gasificación es uno de los parámetros más importantes, por lo que necesita ser controlado con precisión, el mal control de la temperatura puede disminuir la eficiencia del proceso pues puede producir una mayor cantidad de alquitranes en el gas de síntesis (Ruiz et al., 2013). Para gasificadores Downdraft se encuentra que las temperaturas para cada una de las zonas de la gasificación son las que se presentan en la Tabla 16.

Tabla 16. Temperaturas del proceso de gasificación.

Zona	Temperatura (°C)
Secado	200
Pirólisis	400
Oxidación	1000
Reducción	700

Fuente: Tomado de (Basu, 2010)

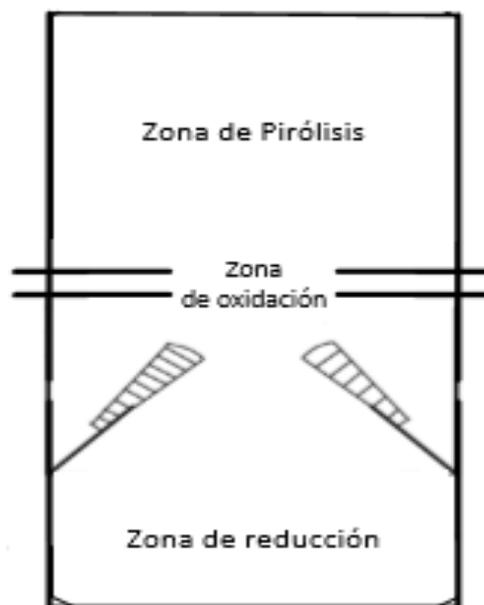
4.5 Dimensionamiento del gasificador

Para realizar el dimensionamiento del equipo se debe tener en cuenta cada una de las partes que conforman el proceso de gasificación, el sistema de alimentación y de recolección de cenizas. Además de esto se debe realizar un análisis de los materiales a utilizar para la construcción de cada parte del equipo, esto basado en las características de las sustancias, la temperatura y la presión. El gasificador está conformado por 4 partes que son la sección interna, externa, parte superior (la cubierta) y parte inferior (rejilla de cenizas).

4.5.1 Sección interna

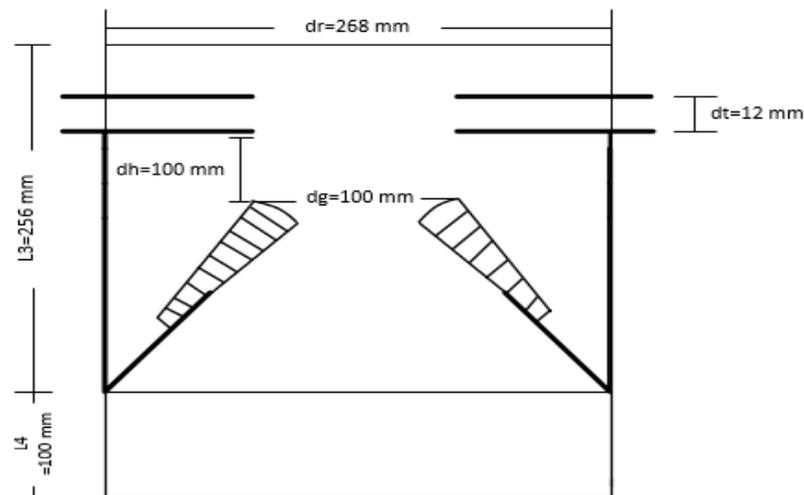
Esta parte del gasificador está conformada por el tubo interno en el que ocurren las reacciones de pirólisis, oxidación y reducción como se puede ver en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

Figura 5. Sección interna del gasificador.



Teniendo el flujo volumétrico del gas de salida se determinaron las medidas de la garganta por medio de valores establecidos en el documento "Handbook of Biomass Downdraft Gasifier Engine Systems". En este documento se especifica que para un flujo volumétrico promedio entre 8 a 60 Nm³/h se debe tener una altura de cámara de oxidación de 256 mm, un diámetro de garganta de 100 mm, una altura de 100 mm sobre la garganta para inyectar el agente gasificante (aire) (Reed & Das, 1988) y una inclinación de 45° (Venselaar, 1982). En la Figura 6 se pueden observar todas las dimensiones dichas anteriormente.

Figura 6. Garganta en la zona de oxidación.



Fuente: Adaptada de (Reed & Das, 1988).

La altura de reducción es $L_4=100$ mm y la altura de la zona de pirólisis se tiene reportada según experiencias anteriores que debe ser aproximadamente de $L_2=150$ mm (Venselaar, 1982).

La altura de la zona de secado y de alimentación se halla en la sección externa cuando se realice las dimensiones de la tolva.

- **Inyectores de aire**

El aire precalentado es inyectado en la zona de oxidación por medio de unas boquillas que son aproximadamente un 7 a 4% del área de la garganta. El número de boquillas debe ser impar para que el aire no golpee con la boquilla del lado opuesto (Basu, 2010). Para un flujo volumétrico de gas de 8 a 63 Nm³/h, el número de boquillas sugerido es de 5 (FAO, 1993), las cuales deben

estar ubicadas a una altura de 100 mm por encima de la garganta y con un diámetro de 10.5 mm para cada boquilla (Reed & Das, 1988).

El aire es transportado al interior del gasificador por unas mangueras que estarán ubicadas en la parte exterior del tubo interno, rodeando un 75% del área del reactor (Zaleta Aguilar Alejandro & Olivares Arriaga Alejandro, 2012). Estas mangueras además de transportar el aire transmitirán el calor que tienen el gas de síntesis al aire para precalentarlo antes de que entre a la zona de oxidación.

Para obtener una velocidad de aire recomendada para tuberías entre 9-30 m/s (Universidad de granada, s. f.), se debe determinar un diámetro de tubería que establezca una velocidad entre el rango presentado. Fijando el diámetro de la manguera en 0.019 m (3/4 pulgadas) y teniendo un flujo volumétrico del aire de 22.19 m³/h, se puede obtener la velocidad del aire entre este rango.

$$Velocidad\ del\ aire = \frac{Flujo\ volumétrico\ del\ gas}{Area\ transversal\ del\ tubo}$$

$$Area\ transversal\ del\ tubo = D^2 * \frac{\pi}{4}$$

Ecuación 6

$$Velocidad\ del\ aire = \frac{22.19\ m^3/h}{(0.019\ m)^2 * \pi/4} = 78263\ \frac{m}{h} = 21.7390\ \frac{m}{s}$$

4.5.2 Sección externa

Esta sección está conformada por un tubo exterior que rodea la sección interna, formando una cámara por donde pueden circular los gases hacia el exterior del reactor. El diámetro de este tubo se obtiene por medio de la siguiente ecuación.

$$Velocidad\ del\ gas = \frac{Caudal\ (flujo\ volumetrico\ gas)}{*Area\ (Tubo\ externo)}$$

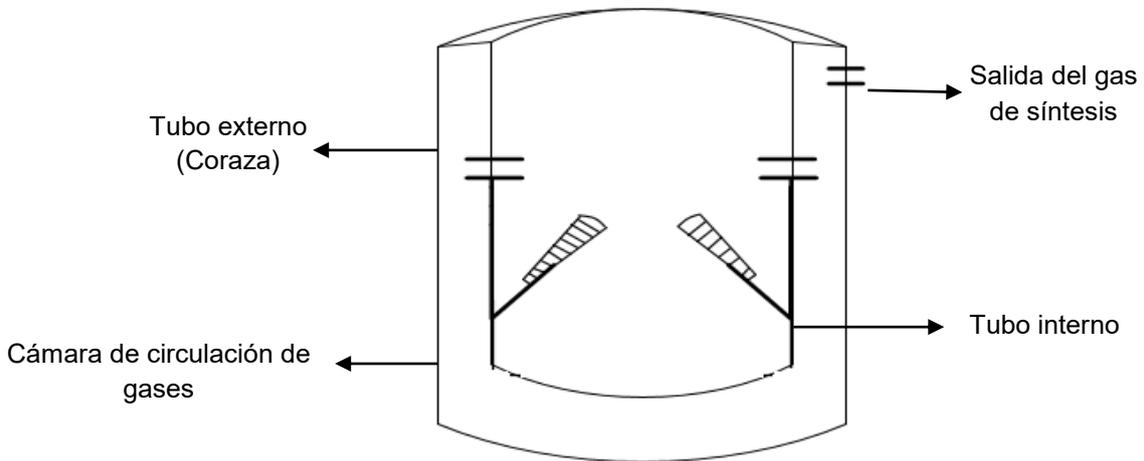
Ecuación 7

$$*Area (Tubo externo) = \pi * (r_{ext} - r_{inter})^2$$

Ecuación 8

En donde el caudal es el flujo volumétrico del gas (V_g) el cual es 44.177 m³/h, la velocidad del gas según la literatura debe ser de 0.5 m/s (Venselaar, 1982) y el radio interior ($r_{interior}$) es de 0.142 m (cabe resaltar que a este radio interior se le sumo el espacio que ocupa las tuberías de cobre que van alrededor de este para inyectar el aire). Sustituyendo la Ecuación 8 en la Ecuación 7 se obtiene un radio exterior (r_{exter}) de 0.230 m

Figura 7. Sección externa del gasificador.



Además del tubo exterior que va desde la zona de reducción hasta la zona de pirólisis, se tiene una tolva donde se encuentra la zona de secado, esta no solo cumple la función de secado sino también de almacenamiento del material. Para hallar las dimensiones de la tolva se realizaron los siguientes cálculos.

Tomando el flujo másico de combustible 22.59 kg/h y estableciendo un tiempo de operación de 4 horas, se puede hallar la cantidad de combustible que puede contener el equipo desde la zona de alimentación hasta la zona de pirólisis, posteriormente se encontrará el volumen que ocupa este combustible en el gasificador.

$$22,59 \frac{kg}{h} * 4 h = 90.368 kg$$

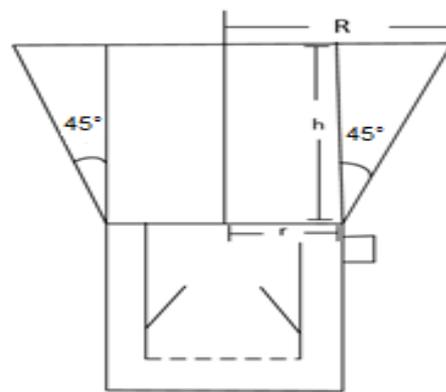
$$V_{comb} = \frac{90.368 \text{ kg}}{263.63 \text{ kg/m}^3} = 0.3427 \text{ m}^3$$

Teniendo el volumen que ocupa el combustible y el volumen de la zona de pirólisis hasta el comienzo de la garganta de 0.014 m^3 , podemos obtener el volumen de la tolva.

$$V_{Piro-garg} = \frac{\pi}{4} * D^2 * h = \frac{\pi}{4} * 0.268^2 * 0.250 = 0.014 \text{ m}^3$$

$$V_{Tolva} = (0.3427 - 0.014) \text{ m}^3 = 0.3286 \text{ m}^3$$

Figura 8. Sección externa con tolva en la zona de secado y alimentación.



Una vez encontrado el volumen de la zona de secado y aplicando la Ecuación 9 y Ecuación 10 se puede hallar el radio y la altura de la tolva, expresando las dos ecuaciones en términos de R. Se debe tener en cuenta que los residuos de poda presentan un ángulo de reposo de aproximadamente 45° (Miliarium.com, s. f.).

$$\tan 45^\circ = \frac{R - r}{h}$$

Ecuación 9

$$V_{tolva} = \pi * (R^2 + r^2 + R * r) * \frac{h}{3}$$

Ecuación 10

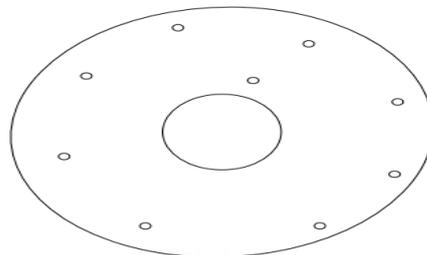
Tabla 17. Medidas de la tolva en la zona de secado y alimentación.

Nombre	Símbolo	Unidades	Valor
Radio Tolva	R	m	0.6813
Altura de la tolva	h	m	0.4133

4.5.3 Parte superior (la cubierta)

En la parte superior se encuentra la tapa o cubierta del reactor, la cual por medio de bridas y pernos se unirá con la parte externa del gasificador. En el centro de la tapa se encuentra un agujero que tendrá una compuerta por donde se alimentará los residuos de poda. También se tendrá en esta zona la válvula escape del gas como sistema de seguridad.

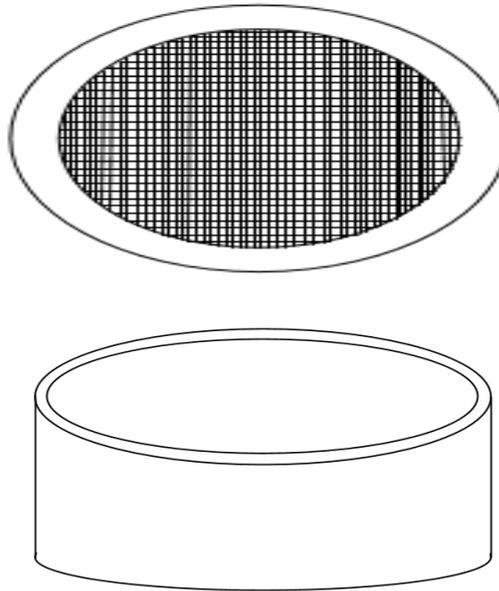
Figura 9. Sección superior del gasificador.



4.5.4 Parte inferior (rejilla de cenizas)

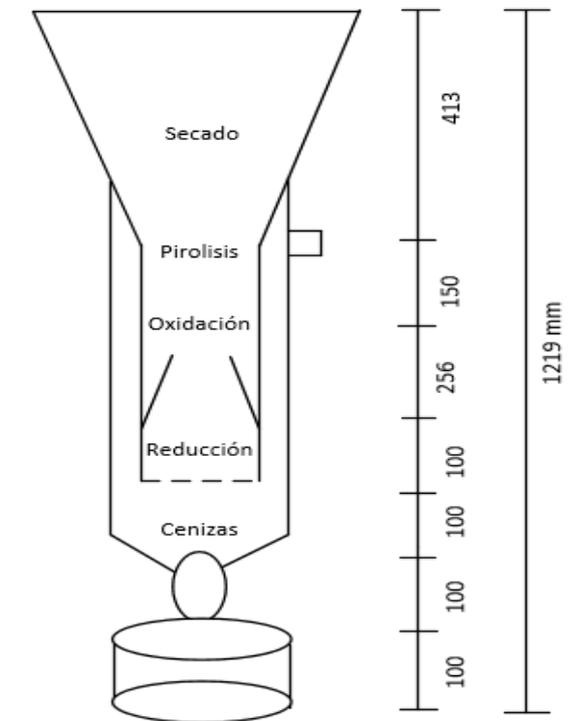
El sistema inferior del gasificador está conformado por una malla y un sistema recolector de ceniza. La malla debe tener orificios de aproximadamente 0.5 mm para retener las partículas de combustible mayores y dejar pasar las partículas menores (cenizas) al sistema de recolección (Reed & Das, 1988).

Figura 10. Sección inferior del gasificador.



El sistema de recolección de cenizas tendrá una altura de 50 mm, la cual se cuenta después de la malla en la zona de reducción. Para la extracción de las cenizas del reactor se contará con una válvula sellada que sólo permitirá el paso de las cenizas hacia otro colector de cenizas, el cual sólo podrá ser vaciado cuando la válvula se encuentre cerrada.

Figura 11. Equipo de gasificación completo.



4.5.5 Materiales para la construcción

Los materiales más apropiados para la construcción del gasificador son aquellos que son resistentes a temperaturas muy altas y sustancias químicas como el amoníaco, ácido clorhídrico y ácido sulfhídrico.

La sección interna del gasificador es la que contiene las temperaturas más altas de todo el proceso, por ende el tubo interno estará conformado por tres capas de materiales resistentes, en donde la primera capa de afuera hacia dentro será fibra cerámica, acero inoxidable 310S y la última capa que es la interior estará compuesta por cemento refractario, este material también cubrirá la garganta (Rodríguez, Silveira, & Perez, 2006).

Para el tubo exterior se contará primero con una capa de foil de aluminio, seguida de una capa de lana mineral y por ultimo estará el acero inoxidable. A continuación se mostrará lo dicho anteriormente en la Figura 12 y Figura 13.

Figura 12. Distribución material tubo interior.

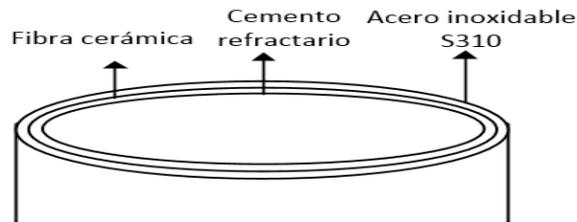
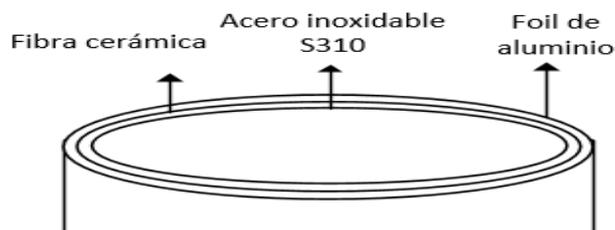


Figura 13. Distribución material tubo exterior.



El resto de componentes del gasificador como la sección inferior, superior y el sistema de alimentación estarán conformados por acero inoxidable 310S y por aislantes térmicos en algunas superficies. A continuación se mostrará las características de los materiales nombrados anteriormente para la construcción del gasificador.

Descripción de cada material

- **Cerámica refractaria**

Es un refractario que presenta alta resistencia a la erosión causada por la velocidad de gases, resiste temperaturas de hasta 1650°C. (Refractermic S.A.S, s. f.). El cemento se trabajara con una técnica de vaciado para darle forma a cada cilindro eterno e interno.

- **Acero inoxidable 310S**

Material que resiste temperaturas de hasta 1100°C, por su alto contenido de níquel y cromo contiene una alta resistencia a la corrosión, convirtiéndolo en un acero de tipo refractario.

Tabla 18. Propiedades físicas del acero inoxidable 310S.

Densidad kg/m ³	Conductividad térmica W/m ² K
7.76	15

Fuente: Tomado de (ThyssenKrupp, s. f.).

- **Fibra cerámica**

Es un material aislante liviano, se utiliza como relleno y divisor de acero en hornos para temperaturas hasta 1260°C.

Tabla 19. Propiedades físicas de la lana mineral.

Densidad kg/m ³	Conductividad térmica W/m ² K
96	2.49

Fuente: Tomado de (Sealco, s. f.).

4.5.6 Sistemas de control

- **Temperaturas**

Para el control de las temperaturas dentro del equipo de gasificación se contará con dos termocuplas, las cuales estarán ubicadas en la zona de oxidación y en la salida del gas de síntesis. Los datos tomados por las termocuplas serán emitidos a un PLC, el cual nos mostrará los cambios de temperatura en el sistema.

- **Presión.**

La presión es otro parámetro fundamental que se debe medir para evitar caídas de presión que puedan perjudicar el proceso de producción y limpieza del gas de síntesis. Para la medición de la presión se contará con un manómetro en la tapa del gasificador gasificador y otro en la salida del gasificador para medir la

presión con la que sale el gas. Al igual que la temperatura los datos de presión serán enviados a un PLC.

Tabla 20. Descripción del gasificador seleccionado.

General	
Tipo de gasificador	Downdraft
Tipo de material gasificado	Residuos de poda
Material de construcción	Acero inoxidable 310S
	Fibra cerámica
	Cemento refractario
Sistema de alimentación	Batch
Capacidad	90.36 kg
Eficiencia	60 %
Agente gasificante	Aire
Tiempo estimado de gasificación	4 horas
Condiciones de operación	
Presión	1 atm
Temperatura máxima	1000 °C
Alimentación de la Biomasa	
Tamaño promedio de partículas	3-7 cm
Humedad promedio	10-20 %
Relación aire-combustible (ER)	2.5
Sistema de recarga del gasificador	Manual
Gas de salida	
Cantidad promedio de gas generado	44.177 m ³ /h
Cantidad de partículas	Bajo
Poder calorífico inferior (PCI)	6.1 MJ/m ³
Temperatura de salida	700 °C

5. EQUIPOS PARA ACONDICIONAMIENTO DEL GAS Y GENERACIÓN DE ENERGÍA

El gas de síntesis obtenido en el proceso de gasificación debe pasar por una etapa de limpieza, en donde se eliminen la mayor cantidad posible de alquitranes y de polvo, para disminuir el desgaste del motor. Después de la limpieza debe pasar por un sistema de enfriamiento, debido a que el gas debe estar a una temperatura ambiente para entrar al motor y poder obtener una mayor potencia de salida (FAO, 1993). Las características que debe tener el gas antes de ser utilizado en el motor son las siguientes.

Tabla 21. Propiedades del gas para uso en motores y turbinas.

Parámetro	Unidades	Motor CI	Turbina a gas
Material Particulado	mg/Nm ³	<50	<30
Tamaño de partícula	µm	<10	<5
Alquitranes	mg/Nm ³	<100	No determinado

Fuente: Tomado de (Sanchez, 2007).

Los equipos necesarios para la limpieza y generación de energía a partir del gas de síntesis son:

Ciclón:

Son equipos que permiten la separación de partículas muy pequeñas de un gas, se caracterizan por ser equipos muy sencillos, de alta eficiencia y de bajo costo. La temperatura de trabajo depende del material con el que este fabricado el ciclón, si es de acero inoxidable permite temperaturas de hasta 1000°C (Sanchez, 2007)

Intercambiador de calor:

El gas al salir del gasificador y del sistema de limpieza posee una temperatura de 700°C, la cual debe ser disminuida por medio de un intercambiador para poder ingresar al motor-generador a una temperatura de 30°C. Al realizar el proceso de enfriamiento del gas, se logra condensar el poco contenido de agua y alquitranes presentes en el gas.

Según las características de salida del gas de síntesis se seleccionó el intercambiador de calor de tubos y coraza, debido a que no tiene restricciones en cuanto a la temperatura y la presión a la que se vaya a trabajar, pues es el más resistente comparado con los otros tipos de intercambiadores de calor («Intercambiadores», s. f.).

Motor-generador:

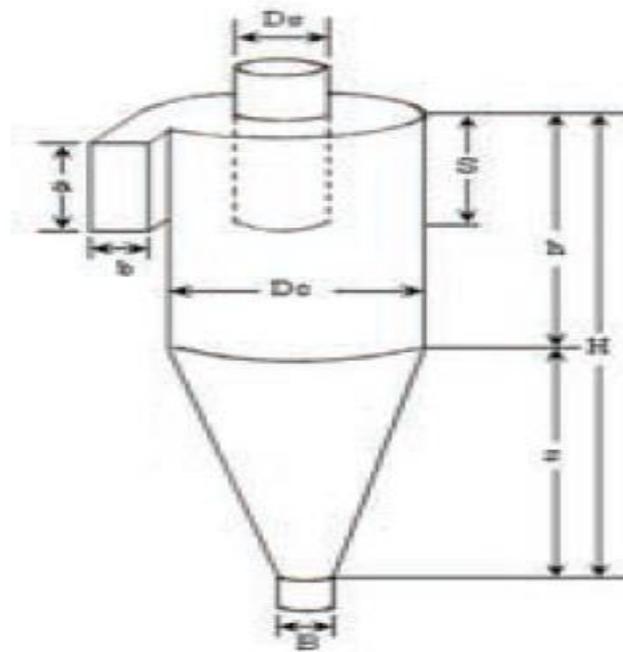
Los motores de combustión interna (MIC) más utilizados para ser adaptados a gasificadores son los motores a gas, los cuales acoplados a un generador (turbina) pueden producir energía eléctrica.

A continuación se presenta el diseño del ciclón e intercambiador y las características del motor-generador seleccionado.

5.1 Ciclón

Debido a que se requiere una eliminación de partículas mayores a $10\ \mu\text{m}$, se determinó que el ciclón más apropiado para el proceso de limpieza es el de alta eficiencia tipo Stairmand, debido a que el 30% del tamaño de diámetro de las partículas contenidas en el gas son menores a $60\ \mu\text{m}$, lo que hace a este equipo el más indicado para la separación de las partículas. A continuación se muestra las dimensiones que se deben obtener del ciclón.

Figura 14. Dimensiones del gasificador.



Fuente: Tomado de (Echeverri Londoño, 2006).

En la Tabla 22 y Tabla 23 se observan las distribuciones de partículas presentes en el gas de síntesis y las características de los ciclones de alta eficiencia.

Tabla 22. Distribución de tamaño de partículas.

Tamaño	% Másico
Mayores a $1000\mu\text{m}$	1.7
$1000\text{-}250\ \mu\text{m}$	24.7
$250\text{-}102\ \mu\text{m}$	23.7
$102\text{-}75\ \mu\text{m}$	7.1
$75\text{-}60\ \mu\text{m}$	8.3
Menor a $60\ \mu\text{m}$	30.3
Perdidas	4.2

Fuente: Tomado de (Reed & Das, 1988)

Tabla 23. Características de los ciclones de alta eficiencia.

Parámetro	Nomenclatura	Ciclón Stairmand
Diámetro del ciclón	D_C/D_C	1.0
Altura de entrada	a/D_C	0.5
Ancho de entrada	b/D_C	0.2
Altura de salida	S/D_C	0.5
Diámetro de salida	D_s/D_C	0.5
Altura parte cilíndrica	h/D_C	1.5
Altura parte cónica	z/D_C	2.5
Altura total del ciclón	H/D_C	4.0
Diámetro salida partículas	B/D_C	0.375
Factor de configuración	G	551.22
Número cabezas de velocidad	NH	6.4
Número de vórtices	N	5.5

Fuente: Tomado de (Echeverri Londoño, 2006)

Para realizar el diseño del ciclón se tomaron en cuenta los datos de la Tabla 24, la cual nos muestra algunas características experimentales y otras teóricas del gas de síntesis.

Tabla 24. Datos para realizar el diseño del ciclón.

Parámetro	Unidad	Valor	Referencia
Velocidad de entrada V	m/s	22	(Echeverri Londoño, 2006)
Densidad partícula ρ_p	kg/m ³	2000	(Reed & Das, 1988)
Flujo Volumétrico del gas V_g	m ³ /s	0.012	Página 29
Densidad del gas ρ_g	kg/m ³	0.35	(Reed & Das, 1988)
Viscosidad del gas μ_g	kg/m*s	2.55E-05	(Reed & Das, 1988)

Para encontrar el diámetro de corte del ciclón primero se debe hallar el área del ducto de entrada por medio de la siguiente ecuación.

$$A = \frac{V_g}{V} = \frac{0.012 \text{ m}^3/\text{s}}{22 \text{ m/s}} = 0.00055 \text{ m}^2$$

Ecuación 11

Con base en la Ecuación 12 que nos expresa el área del ducto de entrada en función del alto y el ancho de entrada del ciclón establecido en la Tabla 23 se puede despejar el diámetro de corte del ciclón y las demás relaciones establecidas para el ciclón tipo Stairmand.

$$A = a \times b$$

Ecuación 12

Altura de entrada del ciclón (a) $a = 0.5 * D_c$

Ancho de entrada del ciclón (b) $b = 0.2 * D_c$

$$D_c = \sqrt{\frac{A}{0.5 * 0.2}} = 0.0746 \text{ m}$$

Ecuación 13

Las dimensiones restantes se despejan en base en el diámetro de corte obtenido en la Ecuación 13 .

Tabla 25. Dimensiones del ciclón.

Parámetro	Símbolo	Unidad	Valor
Altura de entrada al ciclón	a	m	0.037
Ancho de entrada al ciclón	b	m	0.015
Altura de salida del ciclón	s	m	0.037
Diámetro de salida del ciclón	D _s	m	0.037
Altura total del ciclón	H	m	0.299
Altura parte cilíndrica del ciclón	h	m	0.112
Altura parte cónica del ciclón	Z	m	0.187
Diámetro salida del polvo	B	m	0.028
Longitud natural del ciclón	L	m	0.185

- **Eficiencia del ciclón**

La eficiencia del ciclón se calcula con la eficiencia de cada intervalo de tamaño de partícula, en donde se debe hacer uso de algunos términos como factor de configuración, tiempo de relajación y exponente de vórtice para su cálculo. (Echeverri Londoño, 2006).

$$\eta_i = 1 - e^{\left[-2 * \left(\frac{G * T_i * Q * (n+1)}{D_c^3} \right)^{\frac{0.5}{(n+1)}} \right]}$$

Ecuación 14

$$\eta_T = \sum \eta_i * \%M$$

Ecuación 15

Tabla 26. Eficiencia del ciclón.

Parámetro	Símbolo	Unidad	Valor
Volumen ciclón sobre la salida	V _{SC}	m ³	6.13E-05
Factor de dimensiones lineales	K _L	m	0.047
Volumen ciclón sobre la longitud natural	V _R	m ³	4.51E-4
Factor dimensional proporciones volumétricas ciclón	K _C	m ³	0.689
Relación altura de entrada y diámetro del ciclón	K _A		0.500
Relación base de entrada y diámetro del ciclón	K _B		0.200
Factor de configuración	G		551.219
Exponente de vórtice	n		0.299

Tamaño	% M	D _P (m)	T ₁	η _i	η _T
Mayores a 1000	1.7	1.00E-03	4.36E+00	1.00	1.700
1000-250	24.,7	6.25E-04	1.70E+00	1.00	24.700
250-102	23.7	1.76E-04	1.35E-01	1.00	23.700
102-75	7.1	8.85E-05	3.41E-02	1.00	7.100
75-60	8.3	6.75E-05	1.99E-02	1.00	8.300
Menor a 60	30.3	6.00E-05	1.57E-02	1.00	30.300
Eficiencia Total					95.800

5.2 Intercambiador de calor

Con el fin de tener una alta eficiencia en el enfriamiento del gas por medio de un intercambiador de calor se requiere de una buena metodología para el desarrollo del diseño. Para esto, es necesario conocer las condiciones de operación del equipo y del proceso. Para el desarrollo de la metodología se utilizó la norma Tubular Exchanger Manufacturers Association (TEMA) y el Código de la American Society of Mechanical Engineering (ASME).

- **Condiciones y propiedades del gas de síntesis.**

El gas de síntesis al salir del ciclón presenta una temperatura de 700°C (973,15 K) y se espera que sea enfriada hasta 30°C (303,15 K). Según algunas recomendaciones el gas ira por lo tubos debido a que presenta una tendencia a la formación de ensuciamiento y también por su corrosión (Vargas, s. f.).

Tabla 27. Condiciones de operación y propiedades del gas de síntesis.

Datos	Símbolo	Unidad	Valor	Referencia
Flujo másico del gas	\dot{m}_g	kg/h	17.3830	-----
Densidad del gas	d_g	kg/m ³	0.35	(Reed & Das, 1988)
Capacidad calorífica	C_{pg}	kcal/kg	0.3535	(Sanchez, 2007)
Temperatura de entrada	T1	K	973.15	-----
Temperatura de salida	T2	K	303.15	-----

- **Condiciones y propiedades del agua.**

Como fluido de enfriamiento del gas de síntesis se seleccionó el agua, la cual presenta condiciones iniciales de temperatura de 25° C (298,15 K).

Tabla 28. Condiciones de operación y propiedades del agua.

Datos	Símbolo	Unidad	Valor	Referencia
Densidad del agua	d_g	kg/m ³	997.13	(Vaxa software, s. f.)
Flujo supuesto	\dot{m}_a	kg/h	200	----
Capacidad calorífica	C_{pa}	kcal/kg	0.9988	(Vaxa software, s. f.)
Temperatura de entrada	t_1	K	298.15	----

Para el comienzo del diseño del intercambiador de calor se debe hallar la temperatura de salida del agua por medio del calor transferido entre los dos fluidos, a continuación se realizarán los cálculos.

$$Q = m_g * C_{Pg} * (T_2 - T_1) = m_a * C_{Pa} * (t_2 - t_1)$$

Ecuación 16

$$Q = 17.3830 \text{ kg/h} * 0.3535 \text{ kcal/kg} * (973.15 - 303.15 \text{ K})$$

$$Q = 4117.772 \text{ kcal/h} = 6.71 \text{ kW}$$

Ahora con el calor transferido ya obtenido, despejamos la temperatura de salida del agua por medio de la Ecuación 16, dando como resultado una temperatura de salida del agua de 318,76 K.

Con la temperatura de salida del agua se puede hallar la diferencia de temperatura media logarítmica entre el aire y el gas de síntesis.

$$\Delta T1 = T_1 - t_2 = 973.15 \text{ K} - 318.76 \text{ K} = 654.39 \text{ K}$$

$$\Delta T2 = T_2 - t_1 = 303.15 - 298.15 = 5 \text{ K}$$

$$\Delta TLM = \frac{\Delta T2 - \Delta T1}{\ln \frac{\Delta T2}{\Delta T1}} = \frac{(5 - 654.39)}{\ln \left(\frac{5}{654.39} \right)} = 133.228 \text{ K}$$

Ecuación 17

Según la heurística de los intercambiadores de calor, cuando el fluido es un gas que se enfría con agua, el coeficiente de transferencia de calor (U) correspondiente es de 13 kcal/m²*h*K (Huaraz Choi, 2013) y el factor de corrección es 1 pues solo se va tomar un paso por los tubos y por la coraza. A continuación se determina el área y el número de tubos que se necesitan para el intercambiador.

$$A = \frac{Q}{U * f * \Delta TLM}$$

$$A = \frac{4117.772 \text{ kcal/h}}{13 \frac{\text{kcal}}{\text{m}^3 * \text{h} * \text{K}} * 1 * 133.228 \text{ K}} = 2.377 \text{ m}^2$$

Ecuación 18

Para este tipo de intercambiadores se tiene que el diámetro estándar para los tubos es de 0.75 pulgadas y con una longitud de 16 pies.

$$\#Tubos = \frac{A}{\pi * D_o * L} = \frac{2.377 \text{ m}^2}{0.2918 \text{ m}^2} = 8 \text{ tubos}$$

Ecuación 19

5.3 Motor- Generador

El motor que se seleccionó para la generación de energía fue el motor Jenbacher tipo 2 de GE Energy, el cual funciona con diferentes tipo de gases como el gas natural, biogás, gas de vertedero y gases especiales (gas de gasificación). De acuerdo con una eficiencia del 39% y una potencia entregada al motor de 74.86 kW, se obtiene una potencia eléctrica por parte del motor de 29.19 kW.

Tabla 29. Parámetros de entrada y salida motor seleccionado.

Datos del motor	
Potencia inicial kW	74.86
Eficiencia del motor	0.39
Potencia salida kW Mes	583.88

Fuente: Elaboración propia.

5.4 Diagrama de bloques (BFD) y diagrama de flujo (PFD) del proceso de gasificación.

Figura 15. Diagrama de bloques (BFD).

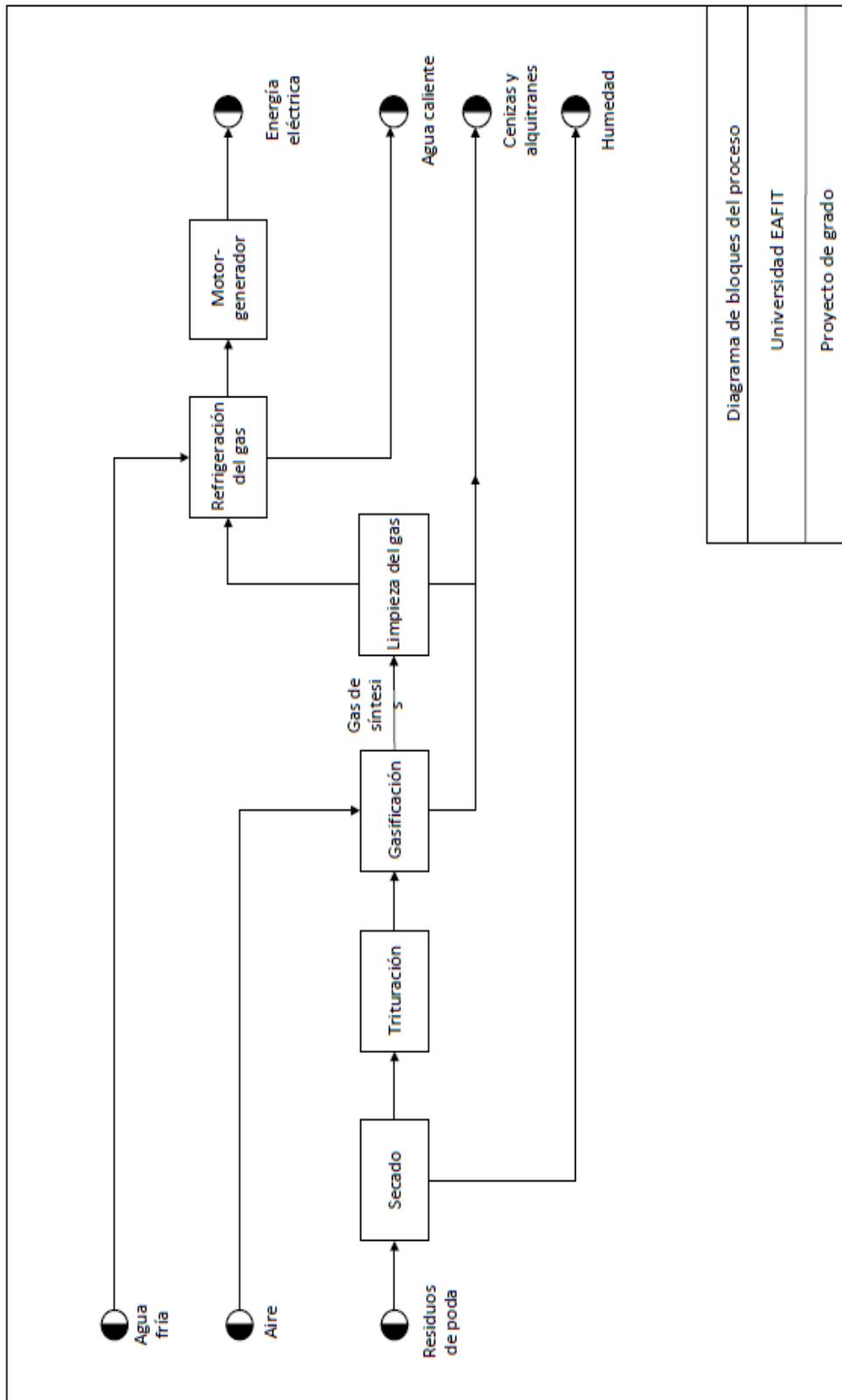
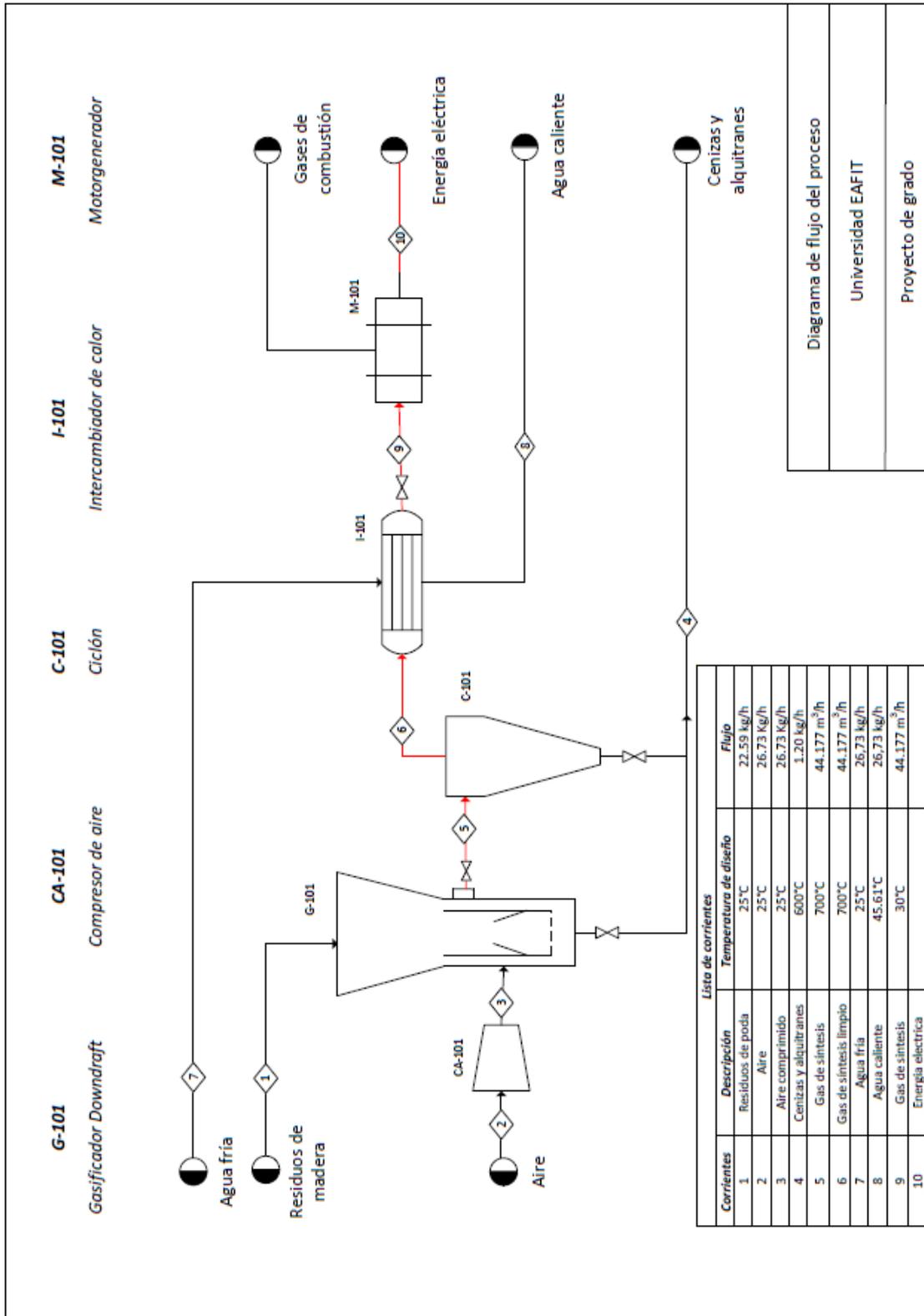


Figura 16. Diagrama de flujo de proceso (PFD).



6. ANÁLISIS FINANCIERO

Para la realización del análisis financiero se consideró que la energía generada por el gasificador podía ser suministrada a la cafetería de la universidad EAFIT, ofreciendo a estos un valor de venta de cada kW a un porcentaje menor que el ofrecido por el mercado actual. Lo anterior con el fin de obtener un beneficio mutuo en donde la universidad ahorra gastos de disposición final de la madera y la cafetería ahorra costos en la energía. A continuación se mostrará los parámetros de costos de construcción del equipo y gastos generados mes a mes por la gasificación.

Tabla 30. Costo de fabricación del gasificador.

Costo del equipo	
Material	Precio
Lámina acero inoxidable 310S	\$ 490.400,00
Lámina lana	\$ 37.515,60
Cemento refractario	\$ 858.200,00
Malla acero inoxidable de 5mm	\$ 36.780,00
Termocuplas tipo K	\$ 504.000,00
Manómetros digital	\$ 490.400,00
Analizador de gases	\$ 583.576,00
Compresor de aire	\$ 171.640,00
Válvula entrada de aire y salida de gas	\$ 34.328,00
Chipeadora de madera	\$ 2.200.000,00
Torre distribución energía	\$ 2.000.000,00
Mano de obra gasificador	\$ 9.000.000,00
Intercambiador	\$ 8.000.000,00
Motor	\$ 2.452.000,00
Tuberías de cobre	\$ 147.120,00
Tuberías conexión	\$ 96.363,60
Adecuación del lugar	\$ 4.500.000,00
Total	\$ 31.602.323,20

Fuente: (Made in china, s. f.)(Perez y Cardona S.A.S, 2015)

Tabla 31. Gastos que representa el gasificador cada mes.

Datos adicionales	Precio
Sueldo operario con prestaciones	\$ 1.296.000,00
Costo del gas propano pipeta	\$ 30.000,00
Acueducto y alcantarillado	\$ 50.000,00
Arriendo del lugar	\$ 250.000,00
Dotación de seguridad	\$ 100.000,00
Disposición final cenizas	\$ 163.088,64
Disposición final alquitranes	\$ 1.120,00
Madera	\$ 10.000,00
Otros gastos	\$ 420.000,00
Total	\$ 2.320.208,64

Para la realización del flujo de caja se estableció un periodo de trabajo de cinco años, una inflación anual de 4%, una tasa del mercado del 7% y un precio de venta de cada kW de \$410. A continuación se puede observar los ingresos, egresos y el flujo de caja.

Tabla 32. Ingresos y egresos del proceso de gasificación.

Ingresos					
Año	2015	2016	2017	2018	2019
Energía Suministrada	\$2.802.608	\$2.914.712	\$3.031.301	\$3.152.553	\$3.278.655
Otros Ingresos	\$33.228.000	\$34.557.120	\$35.939.404	\$37.376.980	\$38.872.060
Total Ingresos	\$36.030.608	\$37.471.832	\$38.970.706	\$40.529.534	\$42.150.715

Egresos					
Año	2015	2016	2017	2018	2019
Operario	\$15.552.000	\$16.174.080	\$16.821.043	\$17.493.884	\$18.193.640
Gastos mensuales	\$12.290.503	\$12.782.123	\$13.293.408	\$13.825.145	\$14.378.150
Total egresos	\$27.842.503	\$28.956.203	\$30.114.451	\$31.319.030	\$32.571.791

Tabla 33. Flujo de caja

Año	Detalle		
	Ingresos	Egreso	Total Flujo
0	-	(31.102.323,2)	(31.102.323,2)
1	36.030.608,4	(27.842.503,7)	8.188.105,8
2	37.471.832,8	(28.956.203,8)	8.515.631,0
3	38.970.706,1	(30.114.452,0)	8.856.257,1
4	40.529.534,3	(31.319.030,1)	9.210.508,3
5	42.150.715,7	(32.571.791,3)	9.578.929,4

Tabla 34. Valor presente neto (VPN) y tasa interna de retorno (TIR)

Tasa de mercado	7%
VPN	\$ 4.741.714
TIR	13%

Si se comparan la tasa de mercado y la tasa interna de retorno (TIR) se puede determinar si es rentable o no invertir en este proyecto, pues cuando se tiene una TIR mayor a la tasa del mercado se puede decir que es viable realizar la inversión, como lo es en nuestro caso.

7. CONCLUSIONES

- Después de analizar algunas características fisicoquímicas de los residuos de poda de la universidad EAFIT, se determinó que este material es apto para el proceso de gasificación pues presenta un alto contenido de carbono, un poder calorífico alto, una humedad apropiada y un contenido de cenizas bajo. Adicionalmente cabe resaltar que la humedad, el tamaño de partícula y la densidad bulk son parámetro de proceso que pueden ser razonablemente ajustados.
- El gasificador de lecho fijo de corrientes paralelas (Downdraft) fue seleccionado debido al bajo flujo de combustible alimentado que es de 22 kg/h, para una potencia de 74.86 kW. Este tipo de gasificador es ideal para escalas pequeñas, bajas potencias eléctricas y además presentan un gas con un bajo contenido de alquitranes.
- Las dimensiones del gasificador para la capacidad requerida son: una altura total de 1.219 m, un diámetro de 0.46 m desde la zona de cenizas hasta la zona de pirólisis (zona exterior) y de un diámetro de 1.12 m en la zona de secado y una capacidad de 88.59 kg para un tiempo de gasificación de 4 horas con alimentación batch. El material seleccionado para el gasificador es acero inoxidable 310S, lana mineral y cemento refractario.
- La relación entre aire y combustible debe permanecer siempre en valores bajos aproximadamente entre 0.2 a 0.3, debido a que si ocurre un aumento grande, la temperatura de gasificación aumentará y convertirá el proceso en combustión en lugar de gasificación, lo que llevaría a la formación de productos no deseados como CO₂ y H₂O en el gas de síntesis.
- De acuerdo con el análisis financiero realizado al gasificador con un tiempo de trabajo de 5 años, se obtuvo un valor presente Neto (VPN) de \$ 4.741.714 y una Tasa Interna de retorno (TIR) del 13%, con lo que se concluye que es rentable invertir en este proyecto.
- El combustible utilizado en el proceso de gasificación presenta una cantidad moderada de cenizas volantes en el gas de síntesis, para su limpieza se seleccionó un ciclón, el cual presenta una eficiencia del 95% en la remoción de partículas mayores a los 10 μm . Esta limpieza se

realiza para garantizar el buen funcionamiento del motor, pues este no trabaja con partículas mayores de $10 \mu m$.

- El gasificador diseñado debe entregar al motor-generador un gas de síntesis con una temperatura de $30^{\circ}C$, para esto se diseñó un intercambiador que redujo la temperatura $700^{\circ}C$ a $30^{\circ}C$, utilizando como agente refrigerante el agua con un flujo de 200 kg/h y un calor disipado de 6.711 kW .
- El tratamiento dado a los residuos de poda mediante la gasificación, presenta beneficios ambientales pues al implementar esta tecnología se está reduciendo los índices de contaminación por los gases de efecto invernadero y sociales en cuanto al empleo generado para la operación del gasificador lo que ayuda en el desempleo del país.

8. RECOMENDACIONES

- En caso de trabajar con residuos diferentes a los forestales, se debe realizar un análisis del porcentaje de sulfuro y de cloro presentes en el material, debido a que si se presenta una cantidad alta, aumenta la formación de H_2S y HCL , por lo que se tendría que implementar otro equipo de limpieza adicional que lo elimine como una torre de absorción. Pues de lo contrario se afectaría el buen funcionamiento del motor-generador.
- El agua residual que sale del proceso de enfriamiento del gas, puede ser utilizada como suministro para otros equipos, como por ejemplo en la caldera en donde se beneficiaría su proceso debido a que el agua aportaría calor adicional lo que conllevaría a que la caldera genere vapor más eficientemente.
- Las cenizas y alquitranes que salen del proceso de gasificación pueden convertirse en materia prima para otras industrias como lo son las cementeras, las constructoras de carreteras y los agricultores (fertilizantes), para que no se constituyan como un nuevo residuo del proceso de gasificación de los residuos de poda.
- La alimentación del combustible puede realizarse por medio de equipos adicionales como tornillos sin fin o válvulas tipo mariposa acoplados a la tolva que permitan operar de forma continua, a su vez se podría implementar un sistema de control que monitoree el nivel de combustible dentro de gasificador y poder obtener así más eficiencia del proceso.
- Debido a que la gasificación es una tecnología que no lleva muchos años de desarrollo y que solo existen algunas heurísticas que determinen los parámetros de diseño y operaciones, sería recomendable desarrollar un modelamiento del proceso que evalúe todos los variables del gasificador, para predecir su comportamiento y poder así establecer medidas para mejorar tanto el proceso como equipo de gasificación.

BIBLIOGRAFÍA

- Arroyo, C. G. (2011). Piloto de gasificador downdraft operado con biomasa.
- Basu, P. (2010). *Biomass Gasification and Pyrolysis*. Elsevier Inc.
- Castells, X. E., & García, E. V. (2012). *La gasificación: Tratamiento y valorización energética de residuos* (p. 90). Ediciones Díaz de Santos. Recuperado a partir de <https://books.google.com/books?id=UGNJ28JbNjQC&pgis=1>
- Chopra, S., & Jain, A. K. (2007). A Review of Fixed Bed Gasification Systems for Biomass, *IX*(5), 1-23.
- Demirbas, A. H., & Demirbas, I. (2007). Importance of rural bioenergy for developing countries. *Energy Conversion and Management*, *48*(8), 2386-2398. doi:10.1016/j.enconman.2007.03.005
- EAFIT, departamento de gestión ambiental. (2014). *Información suministrada por el departamento de gestión ambiental de la Universidad EAFIT*.
- Echeverri Londoño, C. A. (2006). Diseño óptimo de ciclones 1. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, *5*(9), 123-139. Recuperado a partir de <http://cdigital.udem.edu.co/ARTICULO/R17600092006146979/Articulo10.pdf>
- El Abedul. (2008). Ley 1259 2008. Recuperado a partir de https://www.crq.gov.co/Documentos/SIGAM/Ley_1259_de_2008.pdf
- Energi, G. (s. f.). Göteborg Energis förgasningssatsning GoBiGas möter det växande behovet av biogas. Recuperado 13 de noviembre de 2014, a partir de http://gobigas.goteborgenergi.se/Sv/Om_GoBiGas
- Energía12. (2012). La gasificación de biomasa. Recuperado a partir de <http://energia12.com/2012/10/26/la-gasificacion-de-biomasa/>
- FAO. (1993). El gas de madera como combustible para motores. Recuperado 14 de noviembre de 2014, a partir de <http://www.fao.org/docrep/t0512s/t0512s03.htm#2.5>. diseño de gasificadores de tiro invertido

- Fernández, L. G. (2011). *Obtención de gas combustible a partir de la gasificación de biomasa en un reactor de lecho fijo*. Universidad Nacional de Colombia. Recuperado a partir de <http://www.bdigital.unal.edu.co/4133/>
- Francescato, Valter; Zuccoli Bergomi, L. (2008). *Manual De Combustibles. Avebiom*. Recuperado a partir de www.biomassradecentre2.eu/nWWW.AVEBIOM.ORG
- García Mosqueda, G. E. (2013). Evaluación de cuatro tipos de biomasa forestal para su utilización como biocombustible sólidos densificados en Nuevo Leon, México. Recuperado 17 de febrero de 2015, a partir de [http://www.fcf.uanl.mx/sites/default/files/files/M_C_Genaro Esteban Garc%C3%ADa, 1er_Nivel.pdf](http://www.fcf.uanl.mx/sites/default/files/files/M_C_Genaro_Esteban_Garc%C3%ADa,1er_Nivel.pdf)
- García San José, R. (2001). Combustión y combustibles. *Combustion*, 1-23.
- Gasification Technologies Council. (s. f.). The Gasification Industry. Recuperado 13 de noviembre de 2014, a partir de <http://www.gasification.org/what-is-gasification/the-gasification-industry/>
- GE Energy. (2010). Jenbacher tipo 2. Recuperado 16 de enero de 2015, a partir de http://site.ge-energy.com/prod_serv/products/ recip_engines/es/downloads/ETS_SP_T2_screen_August2010_ohne.pdf
- Gonzales Velasco, J. (2009). *Energías renovables*. (Reverté, Ed.) (1ª ed.).
- Gutiérrez Becquet, J. F. (2007). La Gasificación de Madera: Una opción inteligente. Recuperado a partir de www.revista-mm.com/ediciones/rev57/procesos.pdf
- Hoyos, D. Á., Hincapié, M., Marín, J. M., Jiménez, L. M., & Valencia, G. M. (2013). Inventario de los residuos sólidos generados en las empresas Antioqueñas pertenecientes a los principales sectores económicos del departamento. *Revista Ingenierías ...*, 4(1), 27-36. Recuperado a partir de <http://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4694636>
- Huaraz Choi, C. (2013). *Diseño de un gasificador de 25 kW para aplicaciones domésticas usando como combustible cascarilla de arroz*. Pontificia Universidad Católica del Perú. Recuperado a partir de <http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/123456789/4497>

- Intercambiadores. (s. f.). Recuperado 21 de enero de 2015, a partir de <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/3147/1/15T00558.pdf>
- Lee, S. (2006). Gasification of Coal, 25-80.
- Liu, C., Chang, Y., & Kuo, J. (2008). Characteristics of an Air-Blown Fixed-Bed Downdraft Biomass Gasifier, *11(8)*, 4196-4205. doi:10.1016/j.biombioe.2008.03.008.Figure
- Machado, C. M. M. (2010). Situación de los biocombustibles de 2da y 3era generación en América Latina y Caribe. *Organización Latinoamericana de Energía OLADE, Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura IICA*, 55-71.
- Made in China. (s. f.). Cotizaciones materiales del equipo. Recuperado 13 de abril de 2015, a partir de <http://www.made-in-china.com/>
- Miliarium.com. (s. f.). Peso específico y ángulo de rozamiento interno de diversas materias. Recuperado 28 de enero de 2015, a partir de http://www.miliarium.com/Prontuario/Tablas/NormasMV/Tabla_2-2.asp
- Perales Lorente, J. F. (2002). *Desulfuración de gas de síntesis a alta temperatura y presión por absorción en óxidos regenerables*. Universidad Politécnica de Cataluña.
- Perez Juan, Borge David, A. J. (2010). Proceso de gasificación de biomasa: una revisión de estudios teórico experimentales, 95.
- Perez y Cardona S.A.S. Cotización chipeadora (2015). Medellín.
- Pérez-Bayer, J. (2009). Diseño Conceptual de un Gasificador de Biomasa de Lecho Fijo en Equicorriente a Escala Piloto. *Tecno ...*, (22). Recuperado a partir de <http://itmojs.itm.edu.co/index.php/tecnologicas/article/view/267>
- Reed, T., & Das, A. (1988). *Handbook of biomass downdraft gasifier engine systems*. The biomass energy foundation press.
- Refractermic S.A.S. (s. f.). Aislamientos y refractarios térmicos. Recuperado 8 de diciembre de 2014, a partir de <http://www.refratermic.com.co/refractarios.html>
- Restrepo, F. (2009). Generación de energía eléctrica mediante gasificación .

- Rincón, S., Gómez, A., & Klose, W. (2011). *Gasificación de biomasa residual de procesamiento agroindustrial*. Recuperado a partir de <http://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=a2Th1GjH0gEC&oi=fnd&pg=PP1&dq=Gasificaci%C3%B3n+de+biomasa+residual+de+procesamiento+agroindustrial&ots=24UGzstVG9&sig=mnJFbTV4pJw6IXOi6ehjqwUPnHc>
- Rincon Sonia, G. A. (2011). *Gasificación de biomasa Residual*.
- Rodriguez, C., Silveira, J., & Perez, J. (2006). Aspectos constructivos y estudio económico financiero de un gasificador de biomasa lignocelulosica downdraft de 10 kg/h. *abcm.org.br*. Recuperado a partir de <http://www.abcm.org.br/pt/wp-content/anais/encit/2006/arquivos/Energy/CIT06-0403.pdf>
- Rozo, L. (2012). *PMIRS EAFIT 2012*.
- Ruiz, J. a., Juárez, M. C., Morales, M. P., Muñoz, P., & Mendívil, M. a. (2013). Biomass gasification for electricity generation: Review of current technology barriers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 18, 174-183. doi:10.1016/j.rser.2012.10.021
- Sanchez, J. A. (2007). Diseño, especificación y análisis crítico de un sistema de limpieza y depuración de gases para un gasificador de biomasa del tipo flujo descendente.
- Sealco. (s. f.). Manta de fibra cerámica. Recuperado 20 de febrero de 2015, a partir de <http://www.cisealco.com/index.php/productos/aislamiento-termico/manta-de-fibra-ceramica#.VOeXHfmG8rp>
- Solid biofuels — Determination of calorific value. (2009).
- Stassen, H. E. M., & Knoef, H. a M. (1980). Small Scale Gasification Systems. *Biomass*, 1-17.
- ThyssenKrupp. (s. f.). ThyssenKrupp Aceros y Servicios S.A. Recuperado 3 de diciembre de 2014, a partir de http://www.thyssenkrupp.cl/archivos/AISI_310S.pdf
- Universidad de granada. (s. f.). Cálculo de Bombas y Tuberías. Recuperado 29 de enero de 2015, a partir de <http://www.ugr.es/~aulavirtualpfcicq/Bbombasytuberias.html>

- Vargas, P. (s. f.). Intercambiadores tubo y coraza: Análisis térmico. Recuperado 11 de febrero de 2015, a partir de <https://operaciones1.files.wordpress.com/2009/05/intercambiadores-de-calor1.pdf>
- Vassilev, S. V, Baxter, D., Andersen, L. K., & Vassileva, C. G. (2010). An overview of the chemical composition of biomass. *Fuel*, 89(5), 913-933. doi:10.1016/j.fuel.2009.10.022
- Vaxa software. (s. f.). Densidad del agua a diferentes temperaturas. Recuperado 26 de febrero de 2015, a partir de http://www.vaxasoftware.com/doc_edu/qui/denh2o.pdf
- Venselaar, J. (1982). Design rules for down draft wood gasifiers, 1-24.
- Zaleta Aguilar Alejandro, & Olivares Arriaga Alejandro. (2012). Prototipo experimental de un gasificador de biomasa, 910-918.

ANEXOS

Anexo 1. Especies de vegetación existente en la universidad EAFIT.

	TIPO DE PLANTA	FRECUENCIA
		DE PODA Y/O DESHOJE
1	BIFLORA	cada 3 meses
2	CALATHEAS	cada 3 meses
3	BALAZOS	cada 4 meses
4	GINGER	cada 3 meses
5	SYNGONIOS	cada 2 meses
6	BEGONIAS	cada 4 meses
7	PALMA RAFIS	cada 4 meses
8	ACHIRAS	cada 6 meses
9	IRIS DEL BRASIL	cada 3 meses
10	LINOS	cada 4 meses
11	HELECHOS	cada 3 meses
12	TOSCANA	cada 3 meses
13	ROMERO	cada 3 meses
14	BARQUITOS	cada 2 meses
15	UÑA DE DANTA	cada 4 meses
16	CLINOS	cada 2 meses
17	AVES DEL PARAISO	cada 3 meses
18	MAFAFAS	cada 2 meses
19	ROSAS	cada 2 meses
20	TANGO AMARILLO	cada 4 meses
21	MANI FORRAGERO	cada 2 meses
22	ANTURIOS	cada 3 meses
23	SANTAL	cada 3 meses
24	ALA DE ANGEL	cada 3 meses
25	CEBRINA	cada 2 meses
26	PLATANILLOS	cada 2 meses
27	CONGOS	cada 3 meses

Fuente: Tomado de (EAFIT, 2014).

Anexo 2. Cotización chipeadora.



Medellin, Febrero 23 de 2015.

Señora:
Marcela Aristizabal.

Reciba cordial saludo.
A continuación la cotización solicitada.

ITEM	DESCRIPCION PRODUCTO	VALOR UNITARIO EXENTO DE IVA
1	CHIPIADORA ENERMAX FY-S76/SM	1.659.300

Somos grandes contribuyentes y autoretenedores
Cotización valida por 8 días.
Entrega en nuestros puntos de venta.
Favor verificar inventario antes de ordenar su compra.

Sandra María Hernández D.
Licitaciones Pérez y Cardona
Email: licitaciones@tierragro.com.co
Tel. 4444624 Ext 8108

Fuente: Tomado de (Perez y Cardona S.A.S, 2015).

Anexo 3. Ficha técnica fibra cerámica.

AISLANTES CERÁMICOS CERAMIC INSULATORS



REF: 4780.MANTA DE FIBRA CERÁMICA REF: 4780 CERAMIC FIBER BLANKET



DESCRIPCIÓN: Fibras cerámicas centrifugadas inertes químicamente se someten a un proceso de no tejido para conformar mantas cerámicas de excelente resistencia térmica y baja conductividad térmica.

APLICACIONES:

Se utiliza como aislamiento térmico para: hornos (paredes, techos, puertas), chimeneas, cámaras de combustión, filtración a alta temperatura, piezas para la industria de electrodomésticos, la fibra cerámica es utilizada como respaldo en ladrillos y morteros refractarios, además funciona como barrera contra el calor y fuego.

DESCRIPTION: Chemically inert ceramic fibers form nonwoven ceramic blankets with excellent thermal resistance and low thermal conductivity.

APPLICATIONS:

Used as insulation for furnaces (walls, ceilings, doors), chimneys, combustion chambers, high temperature filtration, parts for the appliance industry, ceramic fiber is used as a backup in refractory bricks and mortar, also functions as barrier against heat and fire.

Thickness (in)	Width mm (in.)	Length in (mt)	Density	Area (mt) ²	Temperature °c
1/2"	24" (.61 mts)	600" (15.2 mt)	6 lb/ft ³ (96 kg/m ³) / 8 lb/ft ³ (128 kg/m ³)	9.2 mt ²	Max: 1260°C / Continuos: 1050°C
1"	24" (.61 mts)	300" (7.6 mt)	6 lb/ft ³ (96 kg/m ³) / 8 lb/ft ³ (128 kg/m ³)	4.6 mt ²	Presentation
2"	24" (.61 mts)	150" (3.8 mt)	6 lb/ft ³ (96 kg/m ³) / 8 lb/ft ³ (128 kg/m ³)	2.3 mt ²	Roll of:13.5 kilos.

Fuente: Tomado de (Sealco, s. f.).

Anexo 4. Ficha técnica motor-generator.

GE Energy

Jenbacher tipo 2



over **50**
years of power

Jenbacher gas engines

desarrollo continuo durante 30 años

el motor Jenbacher tipo 2, lanzado al mercado en 1976, presenta un rendimiento extremadamente alto en la gama de potencias entre 250 y 950 kW. Su diseño robusto y su concepto como motor estacionario permiten una larga vida útil de sus componentes y un período de funcionamiento de hasta 60.000 horas de servicio antes de su primera gran revisión. Sus componentes optimizados y un acreditado concepto de control y monitorización confieren a ese motor una excelente fiabilidad.

instalaciones de referencia

modelo, planta	datos técnicos	descripción
J208 GS depuradora Münchs, Austria	Combustible biogás de depuradora tipo de motor 2 x JMS 208 GS-ILC potencia eléctrica 660 kW potencia térmica 761 kW puesta en marcha diciembre 2002 (1º motor), Abril 2005 (2º motor)	Ambos motores J208 GS generan más de 3,3 MWh de electricidad anual, lo suficiente para cubrir la demanda de electricidad de la planta. Además, la energía térmica del motor se utiliza para procesar los residuos orgánicos como para producir energía adicional, mejorando las operaciones de gestión de residuos.
J208 GS Planta de biogás Lamping, Emstek, Alemania	Combustible biogás tipo de motor 1 x JMS 208 GS-ILC potencia eléctrica 330 kW potencia térmica 405 kW puesta en marcha diciembre 2003	el motor a gas funciona con biogás obtenido a partir del abono líquido y las cordeles de la granja Lamping. La electricidad generada se suministra en su totalidad a la red y el calor producido se utiliza para el calentamiento del digestor, así como para la calefacción de la vivienda y los establos.






GE imagination at work

datos técnicos

Configuración	en línea
Volado mm	135
Carrera mm	145
Cilindrada/cilindro litro	2,08
Velocidad nominal rpm	1.500 (50 Hz) 1.800 (60 Hz)
Velocidad media del pistón m/s	7,3 (1.500 rpm) 8,7 (1.800 rpm)
Alcance de suministro	Gen-Set, módulo de cogeneración, Gen-Set/módulo de cogeneración en contenedor
tipos de gases utilizables	Gas natural, flare-gas, biogás, propano, gas de vinadura, gas de depuradora. Gases especiales (p. ej., grubi, gas de coque, gas de madera, gas de pirólisis)
Tipo de motor	J208 GS
Nº de cilindros	8
Cilindrada total litro	16,6

Dimensiones l x an x al (mm)	
Gen-Set	4.900 x 1.700 x 2.000
Módulo de cogeneración	4.900 x 1.700 x 2.000
Contenedor de 20 pies (Gen-Set)	6.100 x 2.500 x 2.800
Contenedor de 40 pies (Módulo de cogeneración)	12.200 x 2.500 x 2.800
Peso seco (kg)	
Gen-Set	4.900
Módulo de cogeneración	5.600
Contenedor de 20 pies (Gen-Set)	13.100
Contenedor de 40 pies (Módulo de cogeneración)	17.000

potencias y rendimientos

Gas natural		1.500 rpm 50 Hz					1.800 rpm 60 Hz				
NOx <	Tipo	Pal (kW) ¹	(gal (kg))	Plar (kW) ²	(gal (kg))	(tot (kg))	Pal (kW) ¹	(gal (kg))	Plar (kW) ²	(gal (kg))	(tot (kg))
500 mg/m ³	208	299	38,2	400	50,9	89,0	335	37,2	407	45,2	82,4
	208	330	38,8	363	42,6	81,4					
250 mg/m ³	208	294	37,6	401	51,3	88,9	335	35,9	418	44,8	80,6

Biogás		1.500 rpm 50 Hz					1.800 rpm 60 Hz				
NOx <	Tipo	Pal (kW) ¹	(gal (kg))	Plar (kW) ²	(gal (kg))	(tot (kg))	Pal (kW) ¹	(gal (kg))	Plar (kW) ²	(gal (kg))	(tot (kg))
500 mg/m ³	208	330	38,8	395	46,4	85,2	335	36,3	402	43,5	79,8
	208	249	39,1	293	46,0	85,1					

1) La potencia eléctrica está basada en la potencia estándar (50) y en condiciones de referencia estándar según ISO 9066-1992 y couple = 1,0 según/los Oud (e)M con su estándar correspondiente.
 2) Índice de mezcla mínimo con gas natural: 70
 3) Potencia eléctrica está con una tolerancia de +/- 3%, enfriamiento de los gases de escape hasta 120°C, con el agua hasta 100°C.
 4) Versión especial con reacción de compresión superior.
 Todos los valores se refieren a un funcionamiento de motor a plena carga y están sujetos a cambios debido al desarrollo técnico.

61043 000001

© 2010 GE Energy Services. Todos los derechos reservados.

Fuente: Tomado de (GE Energy, 2010).