



UNIVERSIDAD ESTATAL AMAZÓNICA
CENTRO DE POSTGRADOS

MAESTRÍA EN AGROINDUSTRIA
MENCIÓN SISTEMAS AGROINDUSTRIALES

PROYECTO DE INNOVACIÓN PRESENTADO PARA
OBTENER EL TÍTULO DE MAGISTER EN
AGROINDUSTRIA

“EVALUACIÓN DEL PROCESO DE GASIFICACIÓN DE
***PIPTOCOMA DISCOLOR* (PIGÜE) COMO FUENTE**
ENERGÉTICA MEDIANTE EL PROGRAMA *ANSYS FLUENT*
***ACADÉMIC*”.**

Miryam Janeth Cárdenas Bonifa

Autora

Ing. Juan Elías González Rivera MSc.

Director

Puyo - Ecuador

2018

DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHO

Yo, Miryam Janeth Cárdenas Bonifa con cédula de identidad 160041641, declaro ante las autoridades educativas de la Universidad Estatal Amazónica, que el contenido del Proyecto de Innovación titulado: “EVALUACIÓN DEL PROCESO DE GASIFICACIÓN DE *PIPTOCOMA DISCOLOR* (PIGÜE) COMO FUENTE ENERGÉTICA MEDIANTE EL PROGRAMA ANSYS FLUENT ACADEMIC”, es absolutamente original, auténtico y personal.

En tal virtud y según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente, certifico libremente que los criterios y opiniones que constan en el Proyecto de Investigación y Desarrollo son de exclusiva responsabilidad de la autora; y que los resultados expuestos pertenecen a la Universidad Estatal Amazónica.

Miryam Janeth Cárdenas Bonifa

C.I. 1600416414

AUTORA



UNIVERSIDAD ESTATAL AMAZÓNICA

Centro de Postgrado

AVAL

Quien suscribe **Ing. Juan Elías González Rivera MSc.**, Director del Trabajo de Titulación, modalidad Proyecto de Innovación titulado: “Evaluación del proceso de gasificación de *Piptocoma discolor* (Pigüe) como fuente energética mediante el programa Ansys Fluent Academic”, a cargo de la egresada **Ing. Miryam Janeth Cárdenas Bonifa** de la primera cohorte de la Maestría en Agroindustria mención Sistemas Agroindustriales de la Universidad Estatal Amazónica.

Certifico haber acompañado el proceso de elaboración del Proyecto de Innovación y considero cumple los lineamientos y orientaciones establecidas en la normativa vigente de la institución por lo que se encuentra listo para ser sustentado.

Por lo antes expuesto se avala el Proyecto de innovación para que sea presentado ante la Dirección de Posgrado como forma de titulación como Magister en Agroindustria mención Sistemas Agroindustriales y que dicha instancia considere el mismo a fin de que tramite lo que corresponda.

Para que a si conste, firmo la presente a los 31 días del mes de octubre de 2018.

Atentamente,

Ing. Juan Elías González Rivera MSc.

DIRECTOR DE TESIS

EL TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN DEL PROYECTO DE INNOVACIÓN CERTIFICA QUE:

El presente trabajo: “Evaluación del proceso de gasificación de *Piptocoma discolor* (Pigüe) como fuente energética mediante el programa *Ansys Fluent Academic*”, bajo responsabilidad de la egresada Ing. Miryam Janeth Cárdenas Bonifa, ha sido meticulosamente revisada, autorizando su presentación.

MIEMBROS DEL TRIBUNAL

Dr. C. Reinier Abreu PhD.
PRESIDENTE DEL TRIBUNAL

Dr. C. Dunia Chávez PhD.
MIEMBRO DEL TRIBUNAL

Dr. C. Luis Bravo PhD.
MIEMBRO DEL TRIBUNAL

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por darme la vida,
salud y fortaleza para seguir adelante;
y estar en compañía de mis padres,
especialmente mi madre que es un pilar fundamental
que hace posible llegar a mis metas.

A mis hijas dueñas de mi corazón y pensamientos,
ellas son mi alegría y aunque
no les he dedicado el tiempo completo
para sus cuidados, siempre me regalan sus sonrisas,
abrazos y ocurrencias.

A todas las personas que son parte de mi vida,
y a pesar de las situaciones saben darme apoyo
de una u otra manera.

A los compañeros y profesores con quienes he compartido
durante el período de estudios
brindándome la oportunidad de contar con su compañía,
alegrías, tristezas, dudas y enseñanzas.

DEDICATORIA

El presente trabajo está dedicado
para mis hijas Edurne, Monserrat y Raziela,
quienes son el motivo y la razón para superarme,
enseñándoles que todo es posible
si hacemos las cosas de corazón
y no por obligación.

A mi madre Guadalupe
quien hizo posible
haber llegado hasta el final
de mi meta propuesta,
brindando amor, cariño y cuidado
a mis hijas en mis momentos de ausencia.

RESUMEN EJECUTIVO Y PALABRAS CLAVE

Pastaza posee una de las especies de bosque nativo y pionero conocido como Pigüe, cuyo aprovechamiento se realiza mediante procesos de transformación primaria. Es así que el presente trabajo tiene como propósito evaluar el proceso de gasificación de *Piptocoma discolor* como fuente energética mediante el programa Ansys Fluent Academic, en la provincia de Pastaza; a través de la caracterización físico-química de la especie. Estos datos fueron ingresados en el software del programa para simular el proceso de gasificación. Para este fin se realizó el diseño del gasificador de tipo flujo descendente (*downdraft*) apto para aplicaciones a pequeña escala; en su diseño se especifica las cuatro zonas principales para el proceso de gasificación como son: secado, pirolisis, oxidación y reducción. Los resultados obtenidos a partir de la simulación fueron fracciones molares de Monóxido de Carbono, Dióxido de Carbono y Oxígeno; y una energía total de 126910,563 J/Kg.

Palabras clave: Pigüe, Biomasa, Gasificación, Energía total, Simulación.

ABSTRACT AND KEYWORDS

Pastaza has one of the species of native forest and pioneer known as Pigüe, whose use is made through primary processing processes. It is so that the purpose of this work is to evaluate the gasification process of *Piptocoma discolor* as an energy source through the Ansys Fluent Academic program, in the province of Pastaza; through the physical-chemical characterization of the species. These data were entered into the software of the program to simulate the gasification process. For this purpose, the design of the downflow type gasifier (downdraft) suitable for small scale applications was carried out; Its design specifies the four main zones for the gasification process, such as: drying, pyrolysis, oxidation and reduction. The results obtained from the simulation were molar fractions of Carbon Monoxide, Carbon Dioxide and Oxygen and a total energy of 126910,563 J / Kg.

Key words: Pigüe, Biomass, Gasification, Total energy, Simulation.

Tabla de contenido

INTRODUCCIÓN.....	1
FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA	5
2.1. PIGÜE: DESCRIPCIÓN BOTÁNICA, DISTRIBUCIÓN NATURAL	5
2.1.1. EXPLOTACIÓN DEL PIGÜE.....	5
2.1.2. POTENCIAL DEL PIGÜE COMO FUENTE ENERGÉTICA.....	6
2.2. BIOMASA.....	6
2.2.1. BIOMASA COMO ALTERNATIVA ENERGÉTICA.....	7
2.2.1.1. VENTAJAS DEL USO DE LA BIOMASA.....	7
2.2.2. APLICACIONES ENERGÉTICAS DE LA BIOMASA.....	8
2.2.2.1. ENERGÍA TÉRMICA.....	8
2.2.2.2. ENERGÍA ELÉCTRICA.....	8
2.2.2.3. ENERGÍA MECÁNICA	8
2.2.3. CARACTERÍSTICAS DE LA BIOMASA.....	8
2.2.3.1. TIPO DE BIOMASA	8
2.2.3.2. CONTENIDO DE HUMEDAD.....	9
2.2.3.3. CONTENIDO DE CENIZAS.....	9
2.2.3.4. PROPORCIÓN DE MATERIAL VOLÁTIL Y CARBONO FIJO	10
2.2.3.5. CONTENIDO ENERGÉTICO.....	10
2.2.3.6. COMPOSICIÓN ELEMENTAL.....	10
2.3. GASIFICACIÓN	11
2.3.1. PROCESO DE GASIFICACIÓN.....	12
2.3.1.1. SECADO	12
2.3.1.2. PIROLISIS	12

2.3.1.3. OXIDACIÓN	13
2.3.1.4. REDUCCIÓN.....	13
2.3.1.5. REACCIONES QUE SE PRODUCEN EN LA GASIFICACIÓN.....	14
2.3.2. AGENTE GASIFICANTE.....	14
2.3.2.1. AIRE.....	14
2.3.2.2. OXÍGENO.....	15
2.3.2.3. VAPOR DE AGUA.....	15
2.4. TIPOS DE GASIFICADORES	15
2.4.1. GASIFICADORES DE LECHO FIJO	16
2.4.1.1. GASIFICADOR DE TIRO DIRECTO (<i>updraft</i>).....	16
2.4.1.2. GASIFICADOR DE TIRO INVERTIDO (<i>downdraft</i>).....	16
2.4.1.3. GASIFICADOR DE FLUJOS CRUZADOS (<i>crossdraft</i>)	17
2.4.2. GASIFICADOR DE LECHO FLUIDIZADO	18
2.5. DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL CFD	19
2.5.1. PROCESO GENERAL DE LA DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL	19
2.5.1.1. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	20
2.5.1.2. MODELO GEOMÉTRICO Y EL DOMINIO FLUIDO.....	20
2.5.1.3. MALLADO Y MÉTRICA DE LA MALLA	21
2.5.2. MODELOS Y ECUACIONES DE LA CFD	21
2.5.2.1. MODELACIÓN DE LA GASIFICACIÓN	21
2.5.3. ANSYS-FLUENT-ACADEMIC-SOLVER.....	22
METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.....	23
3.1. LOCALIZACIÓN	23
3.2. TIPO DE INVESTIGACIÓN.....	23

3.3. MÉTODOS DE LA INVESTIGACIÓN	23
3.3.1. CARACTERIZACIÓN DE LA BIOMASA	24
3.3.1.1. ANÁLISIS APROXIMADO O INMEDIATO	25
I. CONTENIDO DE HUMEDAD	25
II. PORCENTAJE DE CENIZAS	25
III. PORCENTAJE DE MATERIAL VOLÁTIL.....	26
IV. PORCENTAJE DE CARBONO FIJO	26
3.3.1.2. ANÁLISIS ELEMENTAL O ÚLTIMO	27
3.3.1.3. CALORIMETRÍA.....	27
I. CÁLCULO DEL CALOR ESPECÍFICO MEDIANTE ANÁLISIS INMEDIATO....	28
3.3.2. DISEÑO DEL GASIFICADOR.....	28
3.3.3. MODELADO GEOMÉTRICO CAD	29
3.3.4. MALLADO Y MÉTRICA DE MALLA	30
3.3.5. SET-UP EN FLUENT	30
3.3.5.1. APLICACIÓN DE LOS MODELOS.....	31
3.3.6. CONDICIONES DE FRONTERA.....	33
3.3.6.1. CARACTERIZACIÓN DE LA BIOMASA	33
3.3.6.2. DEFINICIÓN DE GRANULOMETRÍA	33
3.3.7. SIMULACIÓN DEL PROCESO DE GASIFICACIÓN.....	33
3.3.7.1. POST-PROCESAMIENTO	34
3.4. TRATAMIENTO DE DATOS.....	34
3.5. RECURSOS HUMANOS Y MATERIALES	34
3.5.1. RECURSOS HUMANOS	34
3.5.2. MATERIALES.....	35

RESULTADOS Y DISCUSIÓN	36
4.1. COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL PIGÜE	36
4.2. DISEÑO DEL GASIFICADOR	38
4.3. MALLADO Y MÉTRICA DE LA MALLA	40
4.4. CONDICIONES DE FRONTERA.....	41
4.4.1. CARACTERIZACIÓN DE LA BIOMASA.....	43
4.5. SIMULACIÓN DEL PROCESO DE GASIFICACIÓN.....	43
4.5.1. MONÓXIDO DE CARBONO	43
4.5.2. DIÓXIDO DE CARBONO	44
4.5.3. OXÍGENO	44
4.5.4. TEMPERATURA.....	45
4.5.5. VELOCIDAD	46
4.5.6. ENERGÍA TOTAL.....	46
CONCLUSIONES.....	47
RECOMENDACIONES	47
REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA.....	48

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Aprovechamiento energético de acuerdo al tipo de biomasa.	9
Tabla 2. Principales reacciones de gasificación.	14
Tabla 3. Composición del gas obtenido en función del agente gasificante.	15
Tabla 4. Principales características de los gasificadores de lecho fijo	18
Tabla 5. Parámetros de calidad para el mallado	21
Tabla 6. Normativas para el análisis inmediato.....	25
Tabla 7. Dimensiones de diámetros del hogar.....	29
Tabla 8. Análisis inmediato y elemental del Pigüe	36
Tabla 9. Composición elemental de diferentes biomásas combustibles.....	37
Tabla 11. Especificaciones volumétricas del gasificador	40
Tabla 12. Especificaciones de calidad de malla ingresada en el software.....	41
Tabla 13. Valores para las condiciones de frontera, entradas.....	42

INTRODUCCIÓN

Con el paso del tiempo a través de la historia, la humanidad se ha desarrollado en dependencia a los recursos no renovables como el petróleo, carbón y gas natural para la generación de energía mediante su uso eléctrico y aplicaciones térmicas. Como consecuencia a esta producción de energía se evidencia un aumento desmesurado de gases contaminantes liberados a la atmosfera o emisiones de gas efecto invernadero que a su vez se deriva en graves cambios en el clima global; el aumento de la producción CO₂ durante los últimos 60 años ha pasado de 4 millones de toneladas a superar los 28 millones (IEA, 2011).

Los altos niveles de CO₂, el calentamiento global y el aumento en los costos de los combustibles fósiles son algunas de las razones para la implementación de nuevas fuentes de energía que sean renovables y limpias. En este sentido se visualiza los datos de inversión direccionados a proyectos que usen energías renovables, pasando de 20 a 160 billones de dólares entre los años 2004 y 2010 (REN21, 2011). Estos hechos han conseguido que aumente el interés mundial en el desarrollo de nuevas tecnologías y nuevas industrias capaces de explotar las fuentes de energía renovable, para la generación de energía (Rodríguez, R. *et al.*, 2013), actualmente la producción de energía a base de estas fuentes representan más del 3% a nivel global (Lior, 2010).

La energía eléctrica producida mediante fuentes renovables está representada por un 75% a partir de hidroeléctricas, 10% energía eólica, 7% pequeñas hidroeléctricas y 4,5% biomasa (REN21, 2011). La biomasa está conformada por compuestos generados en los procesos de fotosíntesis y contenido de carbono permitiendo producir energía mediante tecnologías térmicas o químicas (Vargas, *et al.*, 2008). El término biomasa abarca toda la materia orgánica proveniente de desechos de animales, plantas, árboles y otras fuentes como los residuos generados por la industria de la madera que representan una alternativa para la generación de energía (Balderrama, S. *et al.*, 2011).

La industria maderera aprovecha sólo un 20% de cada árbol extraído, el 40% es abandonado en el campo y un 40% es transformado en astillas, corteza y aserrín mediante procesos de aserrío (Focer, 2001), que contienen un alto potencial energético (Mendoza, J., *et al.*, 2012). Usando la bioenergía que contienen los residuos maderables, se consigue contrarrestar las emisiones de gas efecto invernadero como el CO₂. La eliminación de estos residuos se realiza

de forma descontrolada en gran parte de casos, al no contar con datos de contaminación en los aserraderos, los impactos ambientales negativos se da por el lixiviado tóxico por arrastre de agua; otro impacto negativo es por la descomposición anaerobia y combustión incompleta causando emisiones de gas efecto invernadero (Rodríguez, R., *et al.*, 2013) ocurridos tras la eliminación de residuos al ambiente (Balderrama, S. *et al.*, 2011).

La biomasa como materia prima para la producción de biocombustibles posee características propias como contenido de humedad, densidad, tamaño y composición química. En este contexto es necesario implementar tecnologías adecuadas para la conversión termoquímica; entre ellas está la combustión, pirolisis, fermentación, gasificación entre otras. En el desarrollo de tecnologías comerciales para la conversión energética de biomasa a electricidad se destaca la gasificación, que resulta flexible y es más eficiente en comparación a las tecnologías por combustión (Aguiar-Trujillo, L., *et al.*, 2013; Rodríguez, R., *et al.*, 2013).

El proceso de gasificación es capaz de proveer electricidad en sistemas pequeños, para uso en comunidades y en pequeñas industrias; además de su eficiencia, son menos costosos, tienen mayor disponibilidad en repuestos y que pueden realizarse in situ. La implementación de estas energías alternativas es una estrategia que se orienta a la solución del problema de gestión integral de residuos madereros, mediante su uso como fuente de energía renovable (Rodríguez, R. *et al.* 2013; Durán-García, M. E. 2016) que contribuye de manera favorable al ambiente, además de impactos positivos locales generando empleo y promoviendo un desarrollo sustentable de las comunidades.

En la gasificación se realiza una serie de reacciones entre la biomasa y un agente gasificante para producir gas. El gas obtenido está compuesto principalmente por H_2 y CO y un valor energético considerable que puede ser utilizado en sistemas de combustión interna o en procesos químicos como materia prima para la síntesis de compuestos con mayor valor agregado. En sí la gasificación es un proceso complejo que conlleva al control de múltiples variables que pueden afectar la calidad del gas, producto de las reacciones químicas que se llevan a cabo simultáneamente.

En la actualidad se han desarrollado programas computacionales que establecen las incidencias de las condiciones de operación; utilizada como una herramienta que permite mejorar la comprensión de los procesos. Mediante este sistema la biomasa puede ser

aprovechada al máximo, utilizando el carbono e hidrógeno que esta contiene. De esta manera se plantea la modelación y simulación computacional del proceso, la misma que permitirá observar de desarrollo del proceso de forma aproximada y determinar los puntos a mejorar en busca de la eficiencia; presentando una solución práctica y asequible.

El presente trabajo pretende desarrollar la modelación y simulación de la gasificación del Pigüe mediante el empleo de la herramienta *Ansys Fluent*, generando una alternativa de energía renovable debido a su potencial energético. Así se establece el aprovechamiento del Pigüe a pequeña y mediana escala industrial contribuyendo al cambio en la matriz energética y productiva con el uso de biomasa como combustible y la obtención de gas pobre.

PROBLEMA CIENTÍFICO

Bajo nivel de aprovechamiento de residuos de *Piptocoma discolor* (Pigüe), como fuente de energía renovable para la producción de gas pobre.

HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN

El conocimiento del comportamiento de los residuos de *Piptocoma discolor* (Pigüe), como fuente de energía renovable, permitirá simular el proceso de gasificación mediante el programa *Ansys Fluent Academic*.

OBJETIVO GENERAL

Evaluar el proceso de gasificación de *Piptocoma Discolor* (Pigüe) como fuente energética mediante el programa *Ansys Fluent Academic*.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar el proceso de gasificación para la simulación de la especie *Piptocoma discolor* (Pigüe).
- Caracterizar los parámetros físico-químicos del Pigüe bajo condiciones de gasificación empleando herramientas *Ansys Fluent Academic* con base a estudios previos de laboratorio.

- Simular el proceso de gasificación del Pigüe como combustible biomásico bajo la configuración de los parámetros obtenidos en laboratorio usando un software computacional de análisis numérico MVF (Método de volúmenes finitos).

FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

2.1. PIGÜE: DESCRIPCIÓN BOTÁNICA, DISTRIBUCIÓN NATURAL

El Pigüe pertenece a la familia *Asteraceae*, son plantas herbáceas anuales o perennes. Su característica principal es agrupar las flores en una inflorescencia compuesta como escamas floral. Es una especie pionera, se regenera en forma natural en claros. El árbol es de madera blanda y de crecimiento rápido con una altura máxima de 30 m; el diámetro del tronco es de aproximadamente 60 cm con forma cilíndrica y presenta ramificaciones por encima del tercio inferior. Crece en suelos limosos y arcillosos, que posean buen drenado (Merino, 2011).

El Pigüe está distribuido por toda la región amazónica formando extensos bosques secundarios, encontrándose el centro de mayor densidad en el Puyo. Se encuentra desde los 500 hasta los 1500 msnm en estado normal de desarrollo. Sin embargo, su mayor desarrollo está entre los 900 y 1000 msnm y a temperatura media de 20 °C (Espinoza y Moser citado en Merino, 2011).

2.1.1. EXPLOTACIÓN DEL PIGÜE

El Pigüe es una especie del bosque nativo de la Amazonia. Su aprovechamiento se localiza en 8 provincias, principalmente en Pastaza, Morona Santiago, Napo y Zamora Chinchipe. Su explotación es autorizada mediante la emisión de formularios (11043), que son parte de programas (83) a nivel nacional, con 132'948.35 m³ aprovechados con un incremento del 14% en relación al 2010 (Tene *et al.*, 2011). El volumen producido de madera de los bosques nativos, basados en estudios realizados por el Ministerio de Ambiente del Ecuador MAE, representa el 31,18% para la especie Pigüe (*Piptocoma discolor*), especie pionera en la provincia de Pastaza.

El aprovechamiento del Pigüe se realiza mediante la comercialización en troza destinada a los aserraderos; donde es aprovechado por procesos de transformación primaria destinada fundamentalmente a la construcción; también es comercializada en forma de latilla o tablilla para cajonería como envase y transporte de fruta. Otro de sus usos es en la elaboración de panela y como combustible (Merino, 2011; Erazo, *et al.*, 2014).

2.1.2. POTENCIAL DEL PIGÜE COMO FUENTE ENERGÉTICA

Del procesamiento del Pigüe se pueden obtener productos maderables acabados, otros subproductos de la madera y residuos. Además, en los aserraderos de la provincia de Pastaza se genera un volumen aproximado de biomasa que se desaprovecha anualmente como son: aserrín 4`241.836,5 kg, canteado 4`918.331 kg y corteza 2`155.483 kg en relación al volumen de madera aprovechada que fue de 16`683.711 kg (Pérez, 2016), lo que representa una oportunidad para crear valor agregado. El presente trabajo plantea una vía de utilización para los residuos, como es la gasificación del aserrín de Pigüe.

2.2. BIOMASA

El término biomasa se define como cualquier sólido, líquido, o gas producidos por materiales orgánicos, con procedencia directa (plantas) e indirecta (residuos industriales, domésticos, agrícolas o comerciales). Habitualmente este término es utilizado en un contexto energético, es decir, biomasa energética o biomasa; entendiéndose que hace referencia a los recursos biológicos de origen vegetal o animal (Fernández, 2003).

La biomasa es toda la materia orgánica que se puede convertir en energía. A partir de esta definición se entiende entonces que la misma puede obtenerse a partir de plantas, árboles, desechos de animales, agricultura, aserraderos y residuos urbanos, etc. (Madrid, 2012).

Una de las directivas de la Unión Europea destinada al tema de las energías renovables define a la biomasa como: “fracción biodegradable de los productos, desechos y residuos de origen biológico procedentes de actividades agrarias y forestales, así como de los residuos industriales y municipales” (Madrid, 2012).

La biomasa es una fuente de energía renovable, la energía que contiene procede del sol. Deduciendo se puede decir que la biomasa es la energía solar convertida en materia orgánica (energía química almacenada), mediante el proceso de fotosíntesis realizada por la vegetación, esta energía puede ser recuperada por combustión directa o por procesos de transformación en otros combustibles.

2.2.1. BIOMASA COMO ALTERNATIVA ENERGÉTICA

La biomasa como recurso de energía renovable representa entre un 13 y 15% del suministro de energía primaria global. El potencial energético es utilizado por los países desarrollados en un 25%, mientras que el 75% es utilizado por los países en vía de desarrollo (Parikka, 2004; WBCSD, 2006 citado en Pérez, 2009).

El manejo sostenible y eficiente de la producción de energía proveniente de la biomasa, se evidencia mediante el sinnúmero de beneficios ambientales y sociales, en contraste a la energía generada a partir de recursos fósiles; esto incluye manejo y control de residuos sólidos, reactivación de tierras, diversificación energética, generación de empleo, reducción de emisiones de CO₂, suministro de energía en zonas rurales no interconectadas en los países en vías de desarrollo, entre otros (Pérez, 2009).

El desafío para la creación de un mercado energético a partir de biomasa esta en dependencia del manejo sostenible de los recursos, implementación de un servicio competitivo de la bioenergía y de las tecnologías de conversión eficientes (Pérez, 2009).

2.2.1.1. VENTAJAS DEL USO DE LA BIOMASA

La biomasa al ser considerada una fuente de energía limpia, por su aporte en la lucha contra el cambio climático; contribución a la mejora de la competitividad, empleo y desarrollo regional; y su menor impacto ambiental. Por tanto se describen las siguientes ventajas:

- Valoriza los residuos de origen industrial disminuyendo los vertidos y riesgos ambientales.
- Disminuye el riesgo de plagas forestales y los incendios.
- Las tecnologías para su aprovechamiento tienen un buen grado de desarrollo; disminuyendo la dependencia a los combustibles externos.
- Es un recurso disperso en el territorio, con gran incidencia social y económica en zonas rurales; su producción es totalmente descentralizada.
- El balance de CO₂ emitido es neutro.
- Cero emisiones de contaminantes sulfurados (Peña, 2016).

2.2.2. APLICACIONES ENERGÉTICAS DE LA BIOMASA

La biomasa tiene una principal ventaja como recurso energético al ser de carácter renovable y bajo costo; entre sus características se encuentra la versatilidad, ya que se pueden obtener combustibles renovables en diferentes fases: sólida, líquida y gaseosa.

2.2.2.1. ENERGÍA TÉRMICA

Se obtiene a través de la combustión de biomasa sólida y la combustión de biogás; es la utilizada para el suministro de calor mediante la aplicación de tecnologías, para la obtención de agua caliente sanitaria y procesos industriales. Entre los tipos de biomasa están los procedentes de industrias agrícolas, industrias forestales (astillas, aserrín, virutas, entre otras), y actividades silvícolas, incluido los cultivos leñosos (podas, leñas, entre otras). La biomasa es transformada en briquetas, *pellets*, astillas, etc. mediante técnicas de compactación (Madrid, 2012).

2.2.2.2. ENERGÍA ELÉCTRICA

Es la utilizada para la generación de energía eléctrica a través de ciclo de vapor, turbinas de gas, modo alternativo y cogeneración o co-combustión (2 combustibles, un fósil junto con biomasa), de esta manera se puede obtener energía eléctrica y térmica (Madrid, 2012).

2.2.2.3. ENERGÍA MECÁNICA

Utilizada en las empresas agrarias como bio carburantes para transporte.

2.2.3. CARACTERÍSTICAS DE LA BIOMASA

Para la conversión de biomasa a energía se deben considerar parámetros y condiciones que permita determinar y proyectar el proceso de conversión más propicio, con la finalidad de obtener mayores beneficios económicos y ambientales (Focer, 2001).

2.2.3.1. TIPO DE BIOMASA

La biomasa posee diferentes estados físicos que pueden ser aplicados en los procesos de conversión energética previa la determinación de la factibilidad técnica y económica. En la

tabla 1 se presenta el origen de los recursos de biomasa, el proceso de conversión aplicado, el biocombustible obtenido y su uso.

Tabla 1. Aprovechamiento energético de acuerdo al tipo de biomasa.

Origen	Proceso	Biocombustible/fase	Uso
Cultivos energéticos Residuos selvícolas Residuos agro-industriales	Físico: fragmentación	Leñas y astillas/sólido	Combustión directa en calderas Formación de carbón vegetal Formación de <i>pellets</i> y briquetas
Cultivos energéticos Residuos selvícolas Residuos agro-industriales	Físico-químico: fragmentación, carbonización	<i>Pellets</i> y briquetas /sólido	Formación de <i>pellets</i> y briquetas Combustión directa en calderas Gasificación
Cultivos energéticos Residuos selvícolas Residuos agro-industriales Residuos urbanos	Físico: trituration, secado, compactación	<i>Pellets</i> y briquetas /sólido	Combustión en calderas
Residuos leñosos, paja y residuos de cereales	Termoquímico: calentamiento y enfriamiento rápido	Aceites piroleñosos/líquido	Calderas (energía térmica) Carburante para MEC Turbinas (energía eléctrica)
Residuos leñosos Residuos sólidos urbanos Lodos de depuradora	Termoquímico: Oxidación parcial	Gas pobre/gaseoso	Combustión directa en calderas Carburante MEP y turbinas Para líquidos o gases de síntesis
Residuos ganaderos (purines) Lodos de aguas residuales RSU y residuos orgánicos	Químico: fermentación anaerobia	Biogás/gaseoso	Combustión directa Carburante de MEP Para líquidos o gases de síntesis
Cultivos energéticos Almidón de vegetales Almidón de maderas	Químico: Fermentación, destilación	Bioalcoholes/ líquidos	Carburante para MEP Aditivo para gasolinas Íntesis de biocarburantes
Cultivos energéticos Aceites vegetales residuales de fritura o industriales	Físico-químico: transesterificación	Metilésteres (biodiesel)/líquido	Carburante para MEC Combustión en calderas Aditivo del gasoleo

Fuente: Adaptación de Borja (2006).

2.2.3.2. CONTENIDO DE HUMEDAD

Es la relación de la masa de agua contenida en un kilogramo de materia seca. La mayoría de procesos de conversión energética requieren que la biomasa posea un contenido de humedad inferior al 30%. Los residuos biomásicos por lo general superan dichos valores, lo que supone implementar operaciones de acondicionamiento para el ingreso al proceso de conversión energética (Focer, 2001).

2.2.3.3. CONTENIDO DE CENIZAS

Los residuos sólidos producto de la oxidación completa mediante un proceso termoquímico como resultado a la descomposición química, representa la fracción inorgánica de la biomasa. Los costos globales del proceso y la manipulación pueden verse afectados debido al porcentaje de cenizas. La energía del combustible a obtener se reduce significativamente en dependencia a la cantidad de cenizas de la biomasa a tratar. Debido a su composición las

cenizas representan un problema durante los procesos de conversión energética; estas pueden reaccionar y formar escoria al alcanzar elevadas temperaturas. En consecuencia se reduce el rendimiento e incrementa los costos de operación del sistema (Carlin, 2005; McKendry, 2002 citado en Sánchez, 2015).

2.2.3.4. PROPORCIÓN DE MATERIAL VOLÁTIL Y CARBONO FIJO

El contenido de material volátil es la porción de gases condensables y no condensables que se expulsan en la pirolisis, pueden ser monóxido de carbono, vapor de agua, entre otros. Por lo general la biomasa contiene un alto porcentaje de material volátil; superando el 80%.

El contenido de carbono fijo es la porción de combustible sólido resultante después de la remoción de cenizas, material volátil y humedad. Su determinación se realiza por diferencia de cálculo. El carbono fijo representa a la cantidad efectiva que se puede quemar como combustible después de la salida de volátiles.

2.2.3.5. CONTENIDO ENERGÉTICO

Representa al contenido de calor o energía liberada cuando el combustible se quema con aire; determina la energía disponible en la biomasa. Directamente relacionado con el contenido de humedad, porcentajes superiores de humedad reducen la eficiencia calórica. La unidad de este parámetro se presenta en kJ/kg para los combustibles sólidos; (Parikh *et al.*, 2005; McKendry, 2002a; Focer 2001).

Los valores del poder calorífico superior de las maderas oscilan entre los 4300 y 4950 kcal/kg; debido al elevado porcentaje de resinas que contiene las coníferas el valor del poder calorífico es más alto en comparación a las especies frondosas (Peña, 2016).

2.2.3.6. COMPOSICIÓN ELEMENTAL

La composición elemental determina los elementos químicos contenida en la biomasa en valores porcentuales de peso. El carbono, hidrógeno, oxígeno y el nitrógeno son los componentes principales de la biomasa. El azufre está presente en la biomasa pero en pequeñas proporciones (Prins, 2005).

La biomasa puede ser caracterizada mediante el análisis aproximado y análisis elemental. El carbono es el componente sólido que libera contenido energético y suministra energía adicional al proceso de oxidación, que determina el poder calorífico inferior del combustible.

El conocimiento de la composición de la biomasa es fundamental, esto en función del uso en posteriores procesos de aprovechamiento de la biomasa como fuente energética, mediante la aplicación de tecnologías de transformación de biomasa a combustible (Pérez, J. 2009). Además de poder determinar el tipo de combustible o subproducto energético a obtener (Focer, 2001).

2.3. GASIFICACIÓN

La tecnología de gasificación de la biomasa se ha venido utilizando hace más de cien años. A finales del siglo XVIII se dieron a conocer los principios básicos de la gasificación de la biomasa; pero fue en 1830 cuando se vieron las primeras aplicaciones comerciales. Fue en Londres en el año 1850 que se usó el gas producido por la gasificación de biomasa, en lámparas de alumbrado público; este hecho fue determinante para dar inicio a las investigaciones en esta área (Estrada y Meneses, 2004; Peña, 2016).

En la actualidad es una alternativa al uso de los combustibles convencionales. Es un proceso termoquímico donde se da la transformación de la biomasa a una mezcla de gases combustibles (monóxido de carbono CO, dióxido de carbono CO₂, hidrógeno H₂, metano CH₄, agua H₂O Y nitrógeno N₂) con su respectivo poder calorífico, como resultado a un conjunto de reacciones termoquímicas producidas en un ambiente pobre en oxígeno (Ahumada, L, *et al.*, 2016, Durán-García, M. E. 2016).

Estos gases combustibles resultantes de esta mezcla, pueden ser utilizados principalmente en sistemas industriales constituidos por turbinas, calderas, máquinas de combustión o motores y otros, previo a su acondicionamiento para la generación eléctrica (Durán-García, M. 2016; Sánchez, 2015).

Una de las ventajas de la gasificación es su versatilidad, con la posibilidad de obtener energía en el momento que se requiera. Además, se puede mezclar diferentes tipos de biomasa,

condicionada por la densidad que debe ser $>0,2 \text{ g/cm}^3$. No requiere de grandes instalaciones obteniéndose un rendimiento eléctrico de 15-20% (Peña, 2016).

2.3.1. PROCESO DE GASIFICACIÓN

Para Estrada y Meneses (2004), la gasificación es la conversión de la biomasa sólida en un gas combustible que contiene hidrógeno y monóxido de carbono por medio de un proceso termoquímico. La conversión se realiza en una cámara sellada y cerrada con una presión cercana a la atmosférica (Estrada y Meneses, 2004).

La gasificación realiza cuatro etapas en diferentes áreas del reactor: secado, pirolisis, oxidación y reducción del gas (Martínez, S. 2009; Peña, 2016), independientemente del tipo de gasificador empleado. Las etapas se suceden entre sí siguiendo el orden indicado en una sección específica del gasificador, permitiendo explicar su funcionamiento.

Es importante resaltar que las reacciones no empiezan cuando termina la anterior, sino que estas ocurren de forma simultánea en las secciones correspondientes del gasificador (Solar Energy Research Institute, 1998 citado en Sánchez, 2015).

La generación de cenizas y compuestos condensables como el alquitrán, son productos del proceso de la gasificación; aunque en cantidades menores en relación a la mezcla de gases (Balat, 2009; Devi, *et al.*, 2002).

2.3.1.1. SECADO

La biomasa contiene entre 30 y 60% de agua, pudiendo llegar en determinadas ocasiones al 90%. La presencia de agua en la biomasa representa una pérdida de energía de 2260 kJ por cada kilogramo de agua, energía que es utilizada para evaporar el agua y no puede ser recuperada. Para un correcto funcionamiento y desempeño de los gasificadores se debe ingresar la biomasa con humedades inferiores al 30%, de manera general es recomendable trabajar con valores más bajos. Para el proceso de gasificación se está empleando biomasa con un contenido de agua de entre 10 y 20%.

2.3.1.2. PIROLISIS

Este es un proceso endotérmico, que para llevarse a cabo requiere un aporte de energía; donde las moléculas que conforman la biomasa se rompen obteniéndose otras más cortas, sin

adición de ningún agente externo únicamente por aporte térmico. La pirolisis degrada la biomasa a un sólido consistente como es el carbón vegetal (*charcoal*) que está esencialmente formado por carbono. Se da también la aparición de alquitranes en estado líquido y gaseoso (tars), y los principales gases combustibles (en mayor parte el CO) (Solar Energy Research Institute, 1998 citado en Sánchez, O., 2015).

2.3.1.3. OXIDACIÓN

En esta reacción de oxidación se da la combustión; es la etapa en que los sólidos producidos en la pirolisis y la mezcla de gases entran en contacto con un agente externo que tiene el nombre de agente gasificante, produciéndose las transformaciones pertinentes. Como producto de esta reacción se obtiene dióxido de carbono y cantidades pequeñas de monóxido de carbono.

2.3.1.4. REDUCCIÓN

En esta etapa el carbón vegetal que se ha producido en la etapa de pirolisis se convierte en gas de síntesis. La gasificación comprende todos los procesos que se desarrollan en esta etapa. Las distintas reacciones que permiten gasificar el carbón vegetal están en función del agente gasificante que se proporcionará en la etapa de oxidación. En este proceso el da la reacción del carbono con el vapor de agua y la mezcla gaseosa dando lugar a la formación de hidrógeno y monóxido de carbono.

Las velocidades de reacción depende del potencial reactivo del agente gasificante que se utilice. Por valorar cada elemento gasificante, el oxígeno puro posee mayor potencial, sigue el vapor de agua y el dióxido de carbono. La oxidación parcial es la reacción más rápida porque consume rápidamente el oxígeno, disminuyendo la disposición de oxígeno a las otras reacciones; siendo la gasificación la reacción más lenta, lo que se traduce en una reducción en gran medida de metano generado. En la tabla 2 se describen las principales reacciones de la gasificación.

2.3.1.5. REACCIONES QUE SE PRODUCEN EN LA GASIFICACIÓN

El proceso de gasificación da lugar a un número elevado de reacciones. Los factores que interviene en la composición final del gas son:

- El contenido de humedad
- Composición química de la biomasa (de la cual depende el poder calorífico)
- Temperaturas aplicadas al sistema
- Relación entre el agente gasificante y la biomasa
- Tamaño y densidad de la biomasa
- Proceso de gasificación (Peña, 2016).

El proceso de la gasificación es muy complejo e involucra una serie de reacciones, obteniéndose diversos productos. En la tabla 2 se resumen las principales reacciones de gasificación.

Tabla 2. Principales reacciones de gasificación.

Proceso	Reacciones	Producto
Secado (Biomasa húmeda)	Biomasa seca + H ₂ O _v	char
Pirolisis	Gas + alquitranes + carbón	tar
Oxidación	H ₂ + ½O ₂	H ₂ O _v
Combustión parcial	C + ½O ₂	CO
Combustión total	C + O ₂	CO ₂
Reacción de Boudouard	C + CO ₂	2CO
Reacción agua-gas	C + H ₂ O _v	2CO + H ₂ l

Fuente: Pérez, 2009; Sánchez, 2015

2.3.2. AGENTE GASIFICANTE

Explicado en ítems anteriores, en la etapa de combustión se requiere la interposición de un agente oxidante dando continuidad al proceso. Para el propósito de la gasificación se mencionan los siguientes tipos de agentes como: vapor de agua, oxígeno y aire.

2.3.2.1. AIRE

De entre ellos es el agente más práctico y de fácil utilización, su disponibilidad es infinita y se obtiene de forma gratuita. Como inconveniente es el alto contenido de nitrógeno (79%).

El uso abundante del aire como agente gasificante limita el poder calorífico del gas obtenido a valores aproximados de 5,5 kJ/Nm³ por la presencia del 50% de nitrógeno.

2.3.2.2. OXÍGENO

Mejora sustancialmente el rendimiento global de la gasificación y eleva el poder calorífico del gas de síntesis hasta tres veces. Como inconveniente la obtención es costosa, incrementando el coste y complejidad del sistema. Su uso en el proceso de gasificación elevan las temperaturas, produciéndose escorificación (fusión de cenizas).

2.3.2.3. VAPOR DE AGUA

Como agente gasificante posee dos ventajas: Contiene dos átomos de hidrógeno por cada átomo de oxígeno y no integra nitrógeno indeseado al gas de síntesis. Así el oxígeno desempeña la función de oxidar el carbono y el excedente de hidrógeno consigue aumentar el contenido de H₂ en el gas de síntesis, consiguiendo elevar el poder calorífico.

El uso de estos influye en la composición y en el poder calorífico del gas obtenido. En la tabla 3, se muestran los valores que corresponden al poder calorífico y composición del gas considerando el tipo de agente gasificante utilizado en la gasificación.

Tabla 3. Composición del gas obtenido en función del agente gasificante.

Agente gasificante	PCS (MJ/m ³)	Composición del gas obtenido (% en volumen)						Usos
		H ₂	CO	CO ₂	CH ₄	N ₂	C	
Aire	<6	9-20	14-24	9-20	1-7	48-53	-	Combustible
Oxígeno	10-20	32	48	15	2	3	-	Combustible Gas de síntesis
Vapor de agua	10-20	50	20	22	6	-	2	Combustible Gas de síntesis
Gas natural	42				70-100			

Fuente: Rivera, H. (2016)

2.4. TIPOS DE GASIFICADORES

Los gasificadores se utilizan para la conversión de biomasa en gas. En el interior se producen todas las reacciones termoquímicas antes descritas (Sánchez, O., 2015). La tecnología de generación de energía requiere optimizar el proceso de gasificación mediante el desarrollo de un diseño eficiente y versátil de los reactores, con el fin de asegurar la operación de la planta incluso con diferentes tipos de biomasa.

Los distintos tipos de gasificadores están englobados en dos grandes categorías: los de lecho fijo y los de lecho fluidizado. Esta diferencia es establecida según el comportamiento que presenta el material sólido en la parte inferior del reactor.

2.4.1. GASIFICADORES DE LECHO FIJO

El medio de gasificación para este tipo de reactores es el oxígeno, vapor de agua y aire. Las partículas son transportadas lentamente hacia la parte inferior del reactor por gravedad, generándose de esta manera el gas. Una de las ventajas de estos equipos es el bajo costo de construcción, debido a sus pequeñas dimensiones.

2.4.1.1. GASIFICADOR DE TIRO DIRECTO (*updraft*)

El desplazamiento en el interior del gasificador del sólido y gas se realiza en sentido contrario. De manera progresiva el calor del gas es absorbido, iniciándose la fase de secado evacuando la humedad retirada de la carga alimentada. Se distinguen las fases de pirolisis, reducción y oxidación que trabajan con partículas muy secas para conseguir elevados rendimientos térmicos. El gas de síntesis obtenido sale por la parte superior del gasificador arrastrando gran cantidad de volátiles. Las características de este tipo de gasificador se detallan en la figura 1.

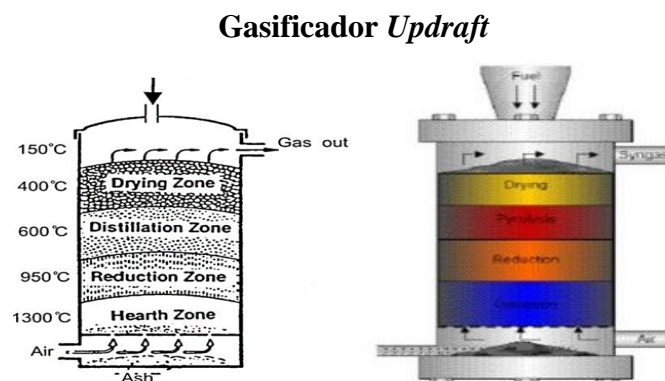


Figura 1: Configuración de tiro directo o *updraft*
Fuente: Ramírez, 2010

2.4.1.2. GASIFICADOR DE TIRO INVERTIDO (*downdraft*)

El desplazamiento del sólido y el gas en el mismo sentido (descendente). Las partículas que ingresan sucesivamente experimentan las reacciones de secado y pirolisis por causa del

incremento progresivo de la temperatura. En la parte inferior del reactor se está produciendo la combustión parcial de productos produciendo el calor necesario para las reacciones antes mencionadas. Se produce el descenso de gases, tar y char hacia la zona de oxidación, se inyecta oxígeno desde el exterior para proporcionar la energía necesaria para continuar y mantener el proceso térmico. Las configuraciones de este tipo de gasificador se pueden apreciar en la figura 2.

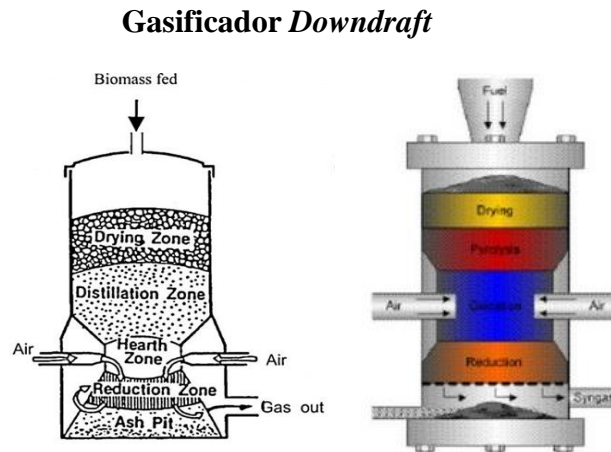


Figura 2: Configuración de tiro invertido o *downdraft*
Fuente: Ramírez, 2010

2.4.1.3. GASIFICADOR DE FLUJOS CRUZADOS (*crossdraft*)

Este tipo de gasificador es una adaptación con fines energéticos mediante el uso de carbón. Las temperaturas de gasificación son muy elevadas comprendidas desde los 1500°C y superiores en la zona de oxidación, hecho que es causa de daños en los materiales. Como ventaja del gasificador de este tipo es la capacidad para operar a muy pequeña escala. Pueden llegar a ser económicamente viables para instalaciones de generación con una potencia instalada inferior a los 10 kW. Las especificaciones para este gasificador es la calidad y pureza del carbón, un parámetro incierto y difícil de determinar. En la siguiente figura 3 se detallan las principales configuraciones de este tipo de gasificador.

Gasificador *crossdraft*

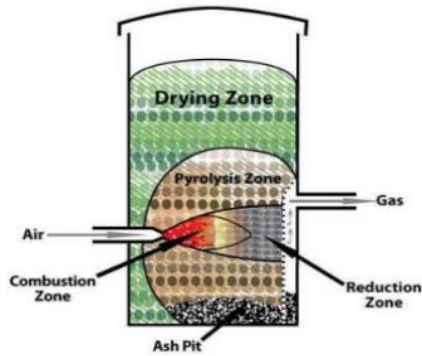


Figura 3: Configuración de flujos cruzados o *crossdraft*
Fuente: Ramírez, 2010

En la tabla 4 se describe las principales características de los gasificadores de lecho fijo.

Tabla 4. Principales características de los gasificadores de lecho fijo

Combustible (madera)	Flujo ascendente (<i>updraft</i>)	Flujo descendente (<i>downdraft</i>)	Flujo cruzado (<i>crossdraft</i>)
Contenido de humedad (% en base húmeda)	25 máximo	60 máximo	10-20
Contenido de cenizas (% en base seca)	6 máximo	25 máximo	0,5-0,1
Temperatura de fusión de las cenizas (°C)	>1250	>1000	
Tamaño de partícula (mm)	20-1000	5-100	5-20
Rango de aplicación (MW)	1-2	2-30	
Temperatura de salida de gas (°C)	700	200-400	1250
Alquitranes (g/Nm ³)	0,015-3,0	30-150	0.01-0,1
Poder calorífico inferior del gas LHV (MJ/Nm ³)	4,5-5,0	5-6	4,0-4,5
Eficiencia térmica del gas (%)	85-90	90-95	75-90

Fuente: (Basu 2010) citado en Heraz, 2012.

2.4.2. GASIFICADOR DE LECHO FLUIDIZADO

En este sistema de gasificador de lecho fluidizado el aire se inyecta por la parte inferior y se conduce a través de un lecho de partículas sólidas que están en estado de suspensión a causa de la velocidad suficiente para este efecto. El lecho acoge del exterior el calor necesario para llevar a cabo el proceso. El ingreso de la materia prima se realiza cuando se ha alcanzado la temperatura necesaria, a la altura del lecho, lugar donde se mezcla con las partículas en

suspensión y adoptando la temperatura del lugar. Desde el ingreso al sistema y de forma simultánea, las partículas experimentan todos los procesos de la gasificación que van desde el secado, pirolisis y las reacciones de oxidación y reducción. El resultado de procesos es la producción de una gran cantidad de gases (FAO Forestry Department, 1986 citado en Sánchez, 2015).

2.5. DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL CFD

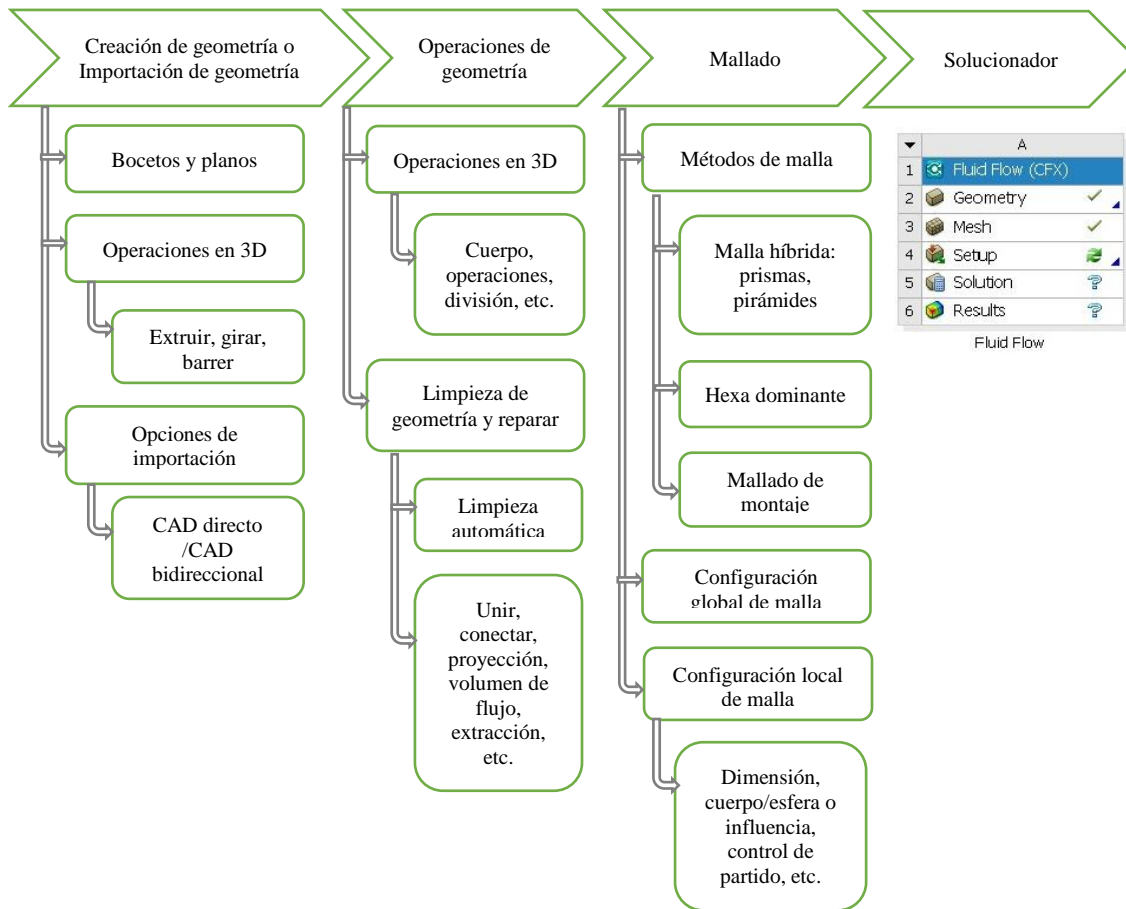
La Dinámica de Fluidos Computacional CFD, figura el flujo de masa y momentum a través de un flujo continuo de esquemas numéricos (Peterson, 1999 citado en el manual de Ansys Fluent Academic). La CFD puede predecir mediante la solución de ecuaciones diferenciales que describen la conservación de la masa y momentum, el comportamiento de un flujo dentro de un medio. El uso del CFD permite resolver ecuaciones muy difíciles como las que provienen de la interacción de las partículas y la geometría. En la actualidad existen supercomputadoras que procesan y resuelven dichas ecuaciones realizándolo en poco tiempo: es así que la CFD se ha convertido en una herramienta con un gran potencial y efectiva (Goula *et al.*, 2008 citado en el manual de *Ansys Fluent Academic*).

Los resultados proporcionados por la CFD son confiables, haciendo posible el diseño e implementación de componentes de un sistema con la finalidad de mejorar su funcionamiento. También se visualiza el comportamiento de un fluido y predice los patrones de flujo del sistema.

Por otra parte permite manipular según conveniencia cada componente del medio en estudio y sus escenarios de acción, lo que se traduce en una reducción de gastos económicos, tiempo y esfuerzo.

2.5.1. PROCESO GENERAL DE LA DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL

El proceso para el uso y aplicación de un análisis mediante CFD que recomienda la Administración Nacional de Aeronáutica y Espacio (NASA), en el archivo *NPARC Alliance Verification and Validation*, está conformado de las siguientes etapas: Ver gráfica 1.



Gráfica 1. Flujo de trabajo de procesamiento de la CFD
Fuente: Manual de *Ansys Fluent Academic 18.2*

2.5.1.1. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

En esta etapa se describe el objetivo del análisis, se concreta las rutas más sencillas para alcanzar el objetivo. Se establece la geometría que será analizada, especificando si pertenece a un todo o se requiere un análisis aislado. Se analiza la necesidad de dimensionamiento espacial, los modelos de análisis pueden ser unidimensional (1D), bidimensional (2D) o tridimensional (3D). Se especifica la temporalidad del fenómeno, este puede ser un flujo en estado estacionario o transitorio, que incluye la naturaleza viscosa del flujo (no viscoso, laminar, turbulento) (ANSYS® 2013).

2.5.1.2. MODELO GEOMÉTRICO Y EL DOMINIO FLUIDO

Se requiere de una herramienta de dibujo CAD en donde se definirá la geometría del cuerpo sobre el cual el flujo será analizado y modelado. La geometría del modelo considera

simplificaciones al mismo; se delimita la extensión del dominio finito de la geometría. Por lo general algunas zonas de frontera del dominio coinciden con las superficies del cuerpo geométrico. Las fronteras libres son superficies por donde el flujo ingresa o sale (ANSYS® 2013).

2.5.1.3. MALLADO Y MÉTRICA DE LA MALLA

El dominio del fluido se discretiza en una malla o cuadrícula a través de elementos o volúmenes finitos. La malla debe poseer una mínima calidad en su cuadrícula, que está definida con parámetros de ortogonalidad. La calidad de la malla se ve afectada especialmente en las zonas donde se requiera ver los fenómenos de capa límite, además considera espesores muy finos en las capas conformadoras de la capa límite; la tabla 5 detalla dichas especificaciones.

Tabla 5. Parámetros de calidad para el mallado

Métricas de la asimetría del espectro					
Excelente	Muy bueno	Bueno	Aceptable	Malo	Inaceptable
0-0,25	0,25-0,50	0,50-0,80	0,80-0,94	0,95-0,97	0,98-1,00
Calidad ortogonal de la asimetría de la malla					
Inaceptable	Malo	Aceptable	Bueno	Muy bueno	Excelente
0-0,001	0,001-0,14	0,15-0,20	0,20-0,69	0,70-0,95	0,95-1,00

Fuente: *Ansys Fluent Academic 18.2*

2.5.2. MODELOS Y ECUACIONES DE LA CFD

Los modelos de la CFD están basados en las ecuaciones de conservación de energía, masa y *momentum*, derivadas de las ecuaciones de Navier-Stokes. Si hay turbulencia en el flujo las ecuaciones se promedian sobre un pequeño incremento donde se aplica una descomposición de Reynolds, mediante el uso de ecuaciones y modelos que describen la energía de turbulencia. Mediante el uso de estas ecuaciones la CFD predice el comportamiento del flujo, adecuándose a cualquier régimen de flujo.

2.5.2.1. MODELACIÓN DE LA GASIFICACIÓN

La dinámica de fluidos computacionales consta de métodos numéricos, que son utilizados para describir la transformación o degradación de la biomasa en componentes más simples. Siendo una importante herramienta de análisis y diseño que logra describir la concentración

de los productos; patrones de flujo y temperatura; y los rendimientos de la gasificación (Kebede, 2011 citado en García, 2014).

Para el diseño óptimo de un gasificador de biomasa es fundamental la comprensión de la interacción entre los mecanismos físicos y químicos, durante la gasificación (Kebede, 2011 citado en García, 2014). Los modelos CFD de sistemas de gasificación están constituidos por fases gas-sólido clasificados en dos enfoques, según el tratamiento de la fase de partículas:

1. Método de elementos discretos basado en el método Euleriano-Lagrangiano (representación de masas puntuales)
2. Método continuo basado en el método Euleriano-Euleriano (modelo de dos fluidos).

2.5.3. ANSYS-FLUENT-ACADEMIC-SOLVER

Fluent Inc. es un software perteneciente a la familia ANSYS, Inc., uno de los líderes mundiales desarrolladores de software de simulación en ingeniería. Uno de sus principales productos de simulación es el software de dinámica de fluidos computacional CFD-FLUENT. Este software es un código general multi-propósito basado en el método de volumen finito y elemento finito aplicado a una malla.

La tecnología de FLUENT ofrece un gran número de modelos físicos que pueden ser aplicados a una gran variedad de ramas de la industria e ingeniería (Xu, 2010) estos son:

1. Modelado geométrico: Ansys-DesingModeler, SolidWorks
2. Generación de malla: Ansys-Meshing
3. Set-up: opciones de simulación
4. Condiciones de fronteras
5. Monitoreo de solución
6. Post-procesamiento: Ansys-Results en diferentes formatos.

METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1. LOCALIZACIÓN

El presente proyecto de investigación se desarrolló en el cantón Puyo, provincia de Pastaza, ubicado en la Latitud: 0° 59' 1" S y Longitud: 77° 49' 0" W, posee una extensión de 29.531 km². Cuenta con un clima subtropical húmedo y es poseedor de una amplia gama de biodiversidad ecológica y antropológica (Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal del Cantón Pastaza, 2012), temperatura promedio de 21.3 °C, microclima cálido húmedo tropical, precipitación media aproximada de 4403 mm, cuenta con 62.016 habitantes (INEC 2010). Está ubicado estratégicamente en la zona central de la Amazonía Ecuatoriana, su cabecera cantonal es la ciudad de Puyo. Es uno de los accesos más importantes hacia el oriente ecuatoriano (Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal del Cantón Pastaza, 2015).

3.2. TIPO DE INVESTIGACIÓN

La investigación es descriptiva mediante la simulación del proceso, en el programa *Ansys Fluent Academic 18.2*, porque está comprendida básicamente por un conjunto de datos iniciales y la aplicación de un sistema de operaciones ordenadas para la formulación de conclusiones, de acuerdo con los objetivos predeterminados.

3.3. MÉTODOS DE LA INVESTIGACIÓN

El método de investigación es del tipo empírico-analítico-sistemático, ya que se parte de una hipótesis acerca del comportamiento energético del Pigüe, que se fundamenta y valida a través del uso de parámetros físico-químico y térmico. Para Rodríguez y Valldeoriola (2012) es el plan o estrategia que permite tener respuestas a los objetivos planteados en el estudio, y a su vez validar o rechazar la hipótesis y la posibilidad de solucionar el problema científico definido en la investigación.

Para Albert: "El problema de investigación establece el marco de referencia para el estudio de las relaciones entre variables, indica en cierto sentido qué observaciones hay que hacer, cómo hacerlas y cómo realizar las representaciones cuantitativas de las observaciones." (Albert, 2007, pág. 58 citado en Rodríguez y Valldeoriola, 2012).

Dentro de este tipo de método se contempla elementos como: variables implicadas en el problema y su operativización, grupos y número de sujetos de cada grupo, asignación de los sujetos a los grupos, categorías o niveles de la variable independiente si resulta necesario, concluyendo con las fases de la medición de la variable dependiente (Rodríguez y Valldeoriola, 2012).

Para el primer objetivo *Identificar el proceso de gasificación para simulación de la especie;*

- Se estudiaron los diferentes tipos de gasificadores, y analizar el tipo que se ajuste a las condiciones de la especie
- Modelado geométrico CAD (Diseño asistido por computador) 3D del gasificador bajo parámetros estandarizados

Para el segundo objetivo, *Caracterizar los parámetros físico-químicos del Pigüe bajo condiciones de gasificación empleando herramientas Ansys Fluent con base a estudios previos de laboratorio.*

- Análisis: químico, elemental, inmediato y calorimetría
- Mallado y métrica de malla
- Condiciones de frontera

Para el objetivo 3, *Simular el proceso de gasificación del Pigüe como combustible biomásico bajo la configuración de los parámetros físico- químicos obtenidos en laboratorio usando un software computacional de análisis numérico MVF (Método de volúmenes finitos).*

- Post procesamiento de los resultados.

3.3.1. CARACTERIZACIÓN DE LA BIOMASA

La caracterización química de la biomasa se obtuvo mediante pruebas de laboratorio. Los mismos que se efectuaron en la Universidad Estatal de Bolívar localizada en el cantón Guaranda, provincia Bolívar-Ecuador. Los análisis realizados fueron:

1. Análisis inmediato
2. Análisis elemental
3. Calorimetría

3.3.1.1. ANÁLISIS APROXIMADO O INMEDIATO

Con el análisis próximo se conseguirá la siguiente información: contenido de humedad, cenizas, materiales volátiles y carbono fijo. En la tabla 6 se resume los parámetros a analizar y sus normativas.

Tabla 6. Normativas para el análisis inmediato

Parámetro	Normativa
Volátiles	Norma UNE-EN 15148
Carbón fijo	Por diferencia de cálculo
Humedad	NTE INEN 896
Ceniza	Norma 14775:2009

Fuente: Elaboración propia

I. CONTENIDO DE HUMEDAD

Se procede al pesaje (peso húmedo, 5 g.) de cada una de las muestras. El secado se lo realiza en la estufa, a una temperatura de 100 ± 5 °C durante 24 horas consecutivas; para determinar el peso seco de la biomasa (molida), se realizaron varias mediciones de peso, hasta la estabilización del valor y calcular el contenido de humedad.

Contenido de humedad

$$CH = \left(\frac{P_{inicial} - P_{seco}}{P_{seco}} \right) * 100 \quad (1)$$

Fuente: NTE INEN 896

Donde

CH = contenido de humedad,

P_{inicial} = peso inicial de la biomasa

P_{seco} = peso de la biomasa

II. PORCENTAJE DE CENIZAS

Para realizar este análisis se colocó la muestra húmeda en una cápsula de porcelana, a una temperatura de 500°C en un tiempo de 2 horas según normativa; que debe alcanzar una velocidad controlada en un tiempo aproximado de 2 horas y las temperaturas entre los 500 hasta los 800°C, hasta lograr la estabilidad.

Porcentaje de cenizas

$$\%C = \frac{100 (m_2 - m)}{(100 - H)(m_1 - m)} * 100 \quad (2)$$

Fuente: NTE INEN 520

Donde

C = contenido de ceniza en % de masa.

m = masa del crisol vacío en g.

m₁ = masa del crisol más muestra en g.

m₂ = masa del crisol con la ceniza en g.

H = porcentaje de humedad en la muestra

III. PORCENTAJE DE MATERIAL VOLÁTIL

Para determinar el porcentaje de material volátil se pesaron muestras de 10 g. Las muestras pesadas fueron colocadas en un crisol y posteriormente en una mufla a 950°C durante 7 minutos. Transcurrido este tiempo se dejó enfriar a temperatura ambiente y se realizó el pesaje de muestras.

IV. PORCENTAJE DE CARBONO FIJO

El contenido de carbono fijo se determinó de manera indirecta aplicando la siguiente fórmula.

Porcentaje de carbono fijo

$$CF \% = 100 - (H + C + MV) \quad (3)$$

Donde:

CF = carbono fijo

H = humedad

C = cenizas

MV = material volátil

3.3.1.2. ANÁLISIS ELEMENTAL O ÚLTIMO

El equipo utilizado es un Elementar Model vario MACRO cube, Order no. 20.10-0000 Serial no. 20144056; 1,5 KW; 50/60 Hz; Protection class IP20; Circuit diagram 20. 00-9010; Manufactured 2014; Made in Germany. Que consta de un horno de combustión primario donde caen las muestras y se produce la combustión instantánea, seguidamente pasa a un horno dándose la postcombustión secundario que retiene el exceso de oxígeno. Los hornos tienen un control de temperatura independiente programable hasta 1100°C.

Mantuvieron un sistema de detección independiente para cada elemento: Carbono, Hidrógeno, Nitrógeno y Azufre. Además cuenta con un cargador automático de muestras con 2 carruseles para 30 muestras cada uno. Se preparan las muestras de 5 miligramos de biomasa, según la normativa UNE – EN 15104:2011.

3.3.1.3. CALORIMETRÍA

Para este análisis se utiliza el Calorímetro Automático Isoperibólico 6400, que cuenta con un subsistema de enfriamiento de circuito cerrado y la más alta automatización en calorimetría según Parr, 2016 y la Norma 14918: 2009. Se pesaron muestras de 1 gramo para el análisis.

El calorímetro nos proporciona datos reales y directos incrementando la exactitud, según varios autores; a través de la calibración con material de referencia (González, D., Cortés, Sánchez Rodríguez, 2010). Ver imagen 1.



Imagen 1. Calorímetro 6400
Fuente: UEB, 2017

I. CÁLCULO DEL CALOR ESPECÍFICO MEDIANTE ANÁLISIS INMEDIATO

Es posible determinar el poder calorífico frente al contenido en volátiles y contenido en carbono fijo, mediante la ecuación obtenida por regresión lineal múltiple expresada por Márquez-Montesino, *et al.*, (2001).

Poder calorífico superior

$$HV = 0,3563 + 0,1755 Mv \quad (4)$$

Donde:

Cf = % Carbono fijo

Mv = % Matera volátil

3.3.2. DISEÑO DEL GASIFICADOR

El tipo de gasificador que se seleccionó para este trabajo es el de lecho fijo en flujo descendente (*downdraft*). Estos dispositivos usan un lecho de partículas de combustibles sólido por donde atraviesan el aire y el gas pasando hacia la parte inferior del reactor. Son más simples y son los únicos adecuados para aplicaciones a pequeña escala. Estos fueron desarrollados para convertir combustibles altamente volátiles (madera, biomasa) en gas de bajo contenido de alquitrán, demostrando ser el diseño más exitoso para la energía. Requieren un bajo contenido de humedad (SERI, 1998).

El dimensionado del hogar desempeña es un factor determinante en la tasa de producción de gas; para dicho fin se presenta una tabla de dimensiones de hogar para una variedad de gasificadores, como base fundamental para el diseño del gasificador. En esta tabla de dimensiones se detallan los valores para la definición del diámetro interno y externo, altura para la entrada de aire, altura de hogar, altura para la recolección de cenizas, número de toberas, entre otras. De forma complementaria se detallan también la carga máxima de biomasa y la velocidad de entrada de aire (SERI, 1998). Las dimensiones se detallan en la tabla 7.

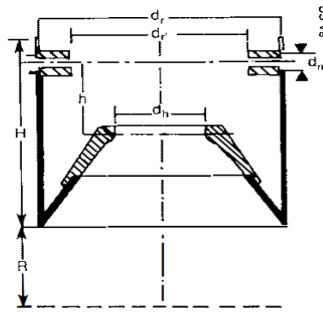
Tabla 7. Dimensiones de diámetros del hogar.

d_r/d_h	d_h mm	d_r mm	d_r' mm	h mm	H mm	R mm	A No.	d_m mm	Máximo consumo de madera kg/h	Velocidad de aire m/s
288/60	60	268	150	80	256	100	5	7,5	14	22,4
300/115	115	300	228	105	275	115	5	11,5	45	30,3
400/200	200	400	318	145	370	153	7	16	110	31,2

Fuente: SERI, 1998

De los valores expuestos en la tabla se seleccionó las dimensiones de mayor valor que corresponde a $d_r/d_h = 400/200$, siendo 400 mm el diámetro externo del gasificador y 200 mm el diámetro interno de la garganta del gasificador.

Además se presenta la gráfica 2 donde se especifica las variable de dimensionado, que permitieron crear la geometría del gasificador.



Gráfica 2: Especificaciones del dimensionado del hogar
Fuente: SERI 1998

Con base a la revisión bibliográfica revisada en Sánchez, 2015; Ramírez, 2010 y SERI 1998, el gasificador debe constar de cuatro zonas diferenciadas para el desarrollo del proceso de gasificación como son: Secado, pirolisis, oxidación y reducción.

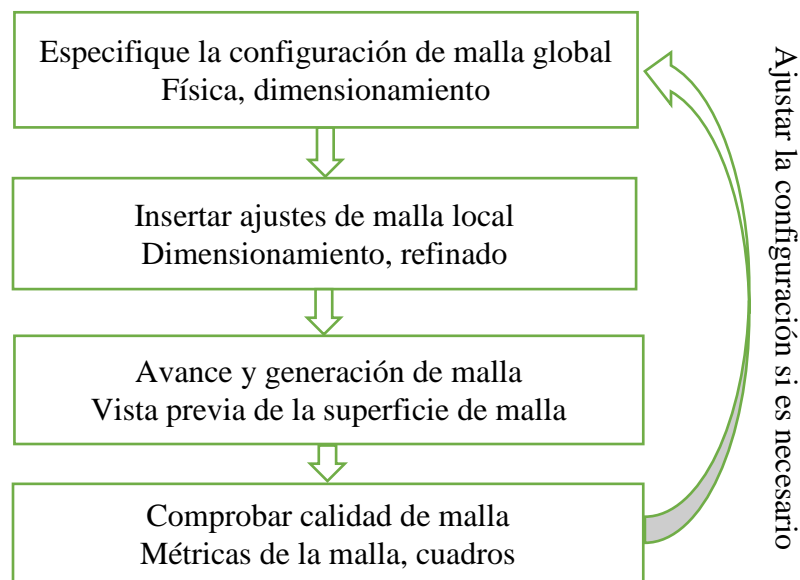
3.3.3. MODELADO GEOMÉTRICO CAD

Partiendo del diseño y dimensionado del gasificador se procedió a ingresar los datos en la herramienta CAD. De esta manera se consiguió un modelo geométrico y se estableció el dominio del fluido y la extensión del dominio finito. En la geometría del gasificador se considera las zonas de fronteras libres por donde el flujo entra o sale; se concluye con la

estructura y topología para el modelado geométrico con condiciones óptimas para la generación del mallado.

3.3.4. MALLADO Y MÉTRICA DE MALLA

La gráfica realizada mediante el diseñador CAD y los datos utilizados en el proceso de diseño son transportados al software de Ansys meshing, donde se especifica las condiciones físicas en las fronteras del dominio establecido. Mediante elementos o volúmenes finitos se discretiza el dominio de fluido en una malla o cuadrícula; pudiendo adoptar el tipo hexaédrico, prismático, tetraédrico y piramidal. La definición de la malla implica la combinación de estas formas, lo que permite la ilustración de la estructura y topología; en la gráfica 3 se describe el proceso a seguir para el mallado y métrica de malla.



Gráfica 3. Proceso del mallado
Fuente: *Ansys Fluent Academic 18.2*

3.3.5. SET-UP EN FLUENT

En esta parte del programa se cuenta con los datos de la geometría y mallado que se van insertando en el programa Set-up, donde se especifica las opciones de entrada de parámetros, ecuaciones, modelos de turbulencia y esquemas numéricos para llevar a cabo la simulación.

3.3.5.1. APLICACIÓN DE LOS MODELOS

Los modelos están dados por el uso de las ecuaciones de Navier-Stokes que son las ecuaciones generales de conservación, movimiento y energía.

- **Ecuaciones de Navier-Stokes** son utilizadas para modelar parámetros del flujo de un fluido (temperatura, presión y velocidad). Los contornos de velocidad son utilizados para trazar trayectorias de partículas que transitan a través del flujo, así se puede calcular distribuciones de tiempo de residencia (Xu, 2010). La forma general de las ecuaciones de Navier-Stokes en coordenadas cartesianas, para un flujo compresible es:

- Ecuaciones de conservación de masa:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (5)$$

- Ecuaciones de cantidad de movimiento (*momentum*):

$$M_x \quad \frac{\partial \rho u}{\partial t} + u \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + v \frac{\partial(\rho u)}{\partial y} + w \frac{\partial(\rho u)}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \frac{\partial^2(u)}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2(u)}{\partial y^2} + \nu \frac{\partial^2(u)}{\partial z^2} \quad (6)$$

$$M_y \quad \frac{\partial \rho v}{\partial t} + u \frac{\partial(\rho v)}{\partial x} + v \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + w \frac{\partial(\rho v)}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \frac{\partial^2(v)}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2(v)}{\partial y^2} + \nu \frac{\partial^2(v)}{\partial z^2} \quad (7)$$

$$M_z \quad \frac{\partial \rho w}{\partial t} + u \frac{\partial(\rho w)}{\partial x} + v \frac{\partial(\rho w)}{\partial y} + w \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \frac{\partial^2(w)}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2(w)}{\partial y^2} + \nu \frac{\partial^2(w)}{\partial z^2} \quad (8)$$

Aceleración local + tres términos de advección = gradiente de presión + tres términos de difusión.

- Ecuación de la energía

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\lambda}{\rho c_p} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\lambda}{\rho c_p} \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\lambda}{\rho c_p} \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (9)$$

Aceleración local + tres términos de advección = difusión

Donde:

x, y, z son los ejes del sistema coordenado

u, v, w son las componentes radial, tangencial y vertical de la velocidad

ρ densidad del fluido

P presión absoluta

T cantidad de calor del fluido

C_p calor específico del fluido

λ conductividad térmica

ν viscosidad cinemática del fluido.

Considerando un flujo incompresible y de viscosidad constante (son características de un fluido como el agua), el desarrollo de las ecuaciones de momentum para un flujo tridimensional y tridireccional es:

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \rho g_x + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (10)$$

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \rho g_y + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (11)$$

$$\rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \rho g_z + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (12)$$

La ecuación de continuidad para un flujo incompresible se define como:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (13)$$

Donde, al prescindir de los términos ρ y ν , las ecuaciones tienen solamente cuatro incógnitas (u , v , w y p). Las ecuaciones de Navier-Stokes son ecuaciones diferenciales parciales acopladas y no lineales y están dentro de las ecuaciones mejor conocidas y más difíciles de las ciencias de la ingeniería. A partir de estas ecuaciones, se pueden obtener ecuaciones para casos especiales (flujo estacionario, bidimensional) omitiendo los términos adecuados.

Excepto para unos cuantos flujos especiales y muy simplificados, las ecuaciones de Navier-Stokes se han resistido a ser solucionadas desde su desarrollo original. Actualmente, con el avance de las computadoras se ha podido dar solución a diversos fenómenos representados por estas ecuaciones, aunque técnicamente son aproximadas, muchas de ellas han resultado ser válidas (Potter *et al.*, 2002).

3.3.6. CONDICIONES DE FRONTERA

Dentro de las opciones de condiciones de frontera constan las entradas, salidas, paredes y orificios, establecidas según la geometría y denominado dominio a simular. Se asignan valores a las condiciones iniciales y de frontera correspondientes.

3.3.6.1. CARACTERIZACIÓN DE LA BIOMASA

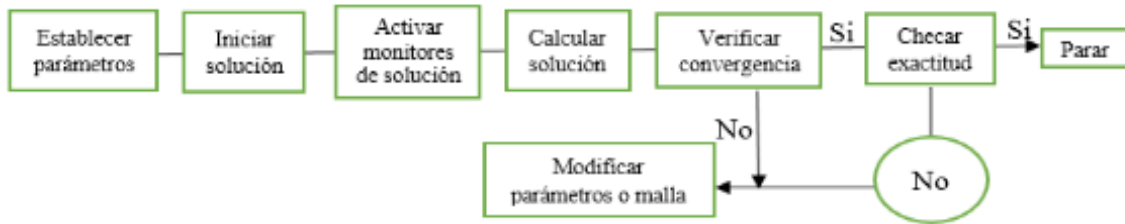
Definido con los parámetros: sólido carbonatado, es en esta parte del software en donde se debe realizar la caracterización de nuestro material antes descrito mediante análisis elemental, aproximado y calorimetría. Además del cumplimiento de especificaciones del programa.

3.3.6.2. DEFINICIÓN DE GRANULOMETRÍA

DPM (Model Particule Fase) nos permite configurar elementos o partículas sólidas que van a tener interacción con un fluido o gas. Para la configuración del programa se ingresa los datos correspondientes a la temperatura de ingreso (°C), magnitud de velocidad (m/s), diámetros mínimo, máximo y promedio (m).

3.3.7. SIMULACIÓN DEL PROCESO DE GASIFICACIÓN

Para la simulación el programa cuenta con una herramienta que monitorea y reporta el comportamiento de los resultados para cada iteración, que tienden a converger o divergir. La gráfica muestra los valores de la resolución de ecuaciones de cada término. Dentro del monitoreo se va verificando los resultados proporcionados por el software, así se pueden identificar anomalías en la convergencia de la solución. Para el monitoreo de la solución se siguió el procedimiento especificado en la gráfica 4 con el fin de obtener una convergencia satisfactoria. La base principal de convergencia estuvo en lograr minimizar el error de solución mediante un número determinado de iteraciones, y satisfacer la igualdad en los modelos matemáticos planteados, con una diferencia mínima de error.



Gráfica 4. Procedimiento para la simulación
Fuente: *Ansys Fluent Academic 18.2*

3.3.7.1. POST-PROCESAMIENTO

El módulo *ANSYS-Results*, donde se exportan los resultados obtenidos en la simulación, para ser visualizados e interpretados mediante la presentación de distintos gráficos facilitando la comprensión del comportamiento de los campos de presión, velocidad, turbulencia, entre otros. Estos resultados pueden ser exportados bajo distintos formatos para el tratamiento de datos en software como TecPlot, Excel, etc.

Es aquí donde se extraen las propiedades del flujo deseadas del campo de flujo analizado y calculado mediante el software. Finalmente y siguiendo los pasos antes indicados se consiguen los resultados generados por análisis y garantizando que los parámetros y resultados analizados mediante CFD, cuenten con sustento teórico con validez y fiabilidad en cada de la simulación, con la finalidad de obtener resultados fieles al fenómeno físico a simular.

3.4. TRATAMIENTO DE DATOS

Los datos fueron analizados mediante el uso del programa de *Ansys Fluent Academic*.

3.5. RECURSOS HUMANOS Y MATERIALES

3.5.1. RECURSOS HUMANOS

Para el desarrollo de esta investigación se contó con el aporte del Ing. Juan Elías González Rivera MSc. como tutor del trabajo y docente de la UEA; el personal encargado del laboratorio de biomasa de la Universidad de Guaranda; el Ing. Víctor Pachacama como

capacitador técnico en el desarrollo del programa de *Ansys Fluent Academic* y Miryam Janeth Cárdenas Bonifa, maestrante de agroindustrias de la Universidad Estatal Amazónica.

3.5.2. MATERIALES

- Computadora,
- Mufla,
- Analizador elemental,
- Calorímetro,
- Horno,
- Software de *Ansys Fluent Academic*.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL PIGÜE

La biomasa utilizada en el presente proyecto fue *Piptocoma discolor* (Pigüe), es de tipo residual y la caracterización consistió en determinar su contenido de humedad, porcentaje de cenizas, material volátil, carbono fijo, carbono, hidrógeno, Oxígeno, nitrógeno, azufre y el poder calorífico. Los resultados obtenidos para los diferentes análisis de detallan en la tabla 8.

Tabla 8. Análisis inmediato y elemental del Pigüe

Parámetro	Valor
<i>Análisis elemental</i>	
C (%)	51,75
H (%)	4,32
N (%)	0,35
O (%)	34,56
<i>Análisis próximo</i>	
Material volátil (%)	84,58
Carbono fijo (%)	14,39
Cenizas (%)	0,96
Humedad (%)	12
Poder calorífico (MJ/kg)	18-19

Fuente: González et. al. 2018

En la tabla 9 aparecen los resultados de la composición elemental de otras biomásas combustibles.

Tabla 9. Composición elemental de diferentes biomásas combustibles.

Biomasa combustibles	C	H	N	S	O (dif.)	Referencia
Aserrín	46,90	5,20	0,10	0,04	37,80	(Abbas T, NH, Lockwood, & Ou, 1994: 99: 617-625)
Cáscara de arroz	40,40	5,00	0,45	0,02	33,60	(Ghaly AE, 1997; 19: 989-104)
Bagazo de caña	49,60	5,70	0,21	0,03	41,10	(de Souza-Santos, 2005)
Pasto (<i>Switchgrass</i>)	46,70	5,90	0,80	0,19	37,40	(D.A, 2000; 19:365-384)
Madera abeto	51,21	6,35	0,23	0	35, 24	(Pinedo, 2013)
Pigüe	51,79	4,32	4,32	0	34,56	González et. al. 2018

Fuente: Elaboración propia

Entre la composición elemental de las biomásas presentadas, tienen similitud en cuanto a la composición de carbono el Pigüe y el Abeto; 51,79 y 51,21 respectivamente, considerando que son biomasa maderables. Seguida por el bagazo de caña que contiene 49,60 de carbono; y siendo la cáscara de arroz la biomasa con menor contenido de carbono 40,40.

Los valores con respecto al poder calorífico de las distintas biomásas se encuentran descritas en la tabla 10.

Tabla 10. Poder calorífico de distintas biomásas.

Biomasa	Poder calorífico MJ/Kg
Carbón coquizado	25 a 32
Madera	10 a 20
Cáscara de coco	18 a 19
Paja	14 a 16
Cáscaras de café	16
Tallos de algodón	16
Cáscaras de cacao	13 a 16
Cuescos de palma de aceite	15
Cáscaras de arroz	13 a 14
Tallos de maíz	13 a 15
Aserrín	11
Pellet de aserrín	20.5
Pellet de madera	20.3

Fuente: Núñez, *et al.*, 2012

Teniendo como referencia el dato del poder calorífico del Pigüe que está en un rango de 18 a 19 MJ/kg, se establece que es similar al poder calorífico de la cáscara de coco. La biomasa con el mayor poder calorífico es el carbón coquizado en un rango de 25 a 32 MJ/kg. Siendo

el aserrín con 11 MJ/kg, la biomasa con menor poder calorífico. Datos registrados en Núñez *et al.*, 2012

4.2. DISEÑO DEL GASIFICADOR

El gasificador es de forma cilíndrica, con una conicidad en la zona de hogar que representa la garganta con un diámetro de 0,2 m. La dimensión del vaso por encima del lecho aumenta de diámetro, consiguiendo la reducción de velocidad del gas y la recirculación de las partículas dentro del lecho. Tiene una altura total de 1,74 m; el diámetro externo es de 0,4 m; por donde se realiza la entrada de biomasa, consta con una puerta de cierre hermético.

El diseño consta de un conjunto de boquilla en número impar para que los fluidos de una boquilla no afecten a la boquilla opuesta. Las boquillas están unidas a un distribuidor de distribución unido a la superficie exterior del gasificador y a un gran puerto de entrada de aire.

En la parte inferior del gasificador, en la zona de reducción se encuentra una válvula tipo ballesta, que permite el control de la salida de gases. También se colocó una rejilla para el paso de residuos y serán acumulados en la zona de residuos ubicada en la base del dispositivo.

La geometría establecida para el desarrollo de la modelación numérica se detalla en la figura 4 donde se definió el interior del gasificador como un cuerpo sólido.

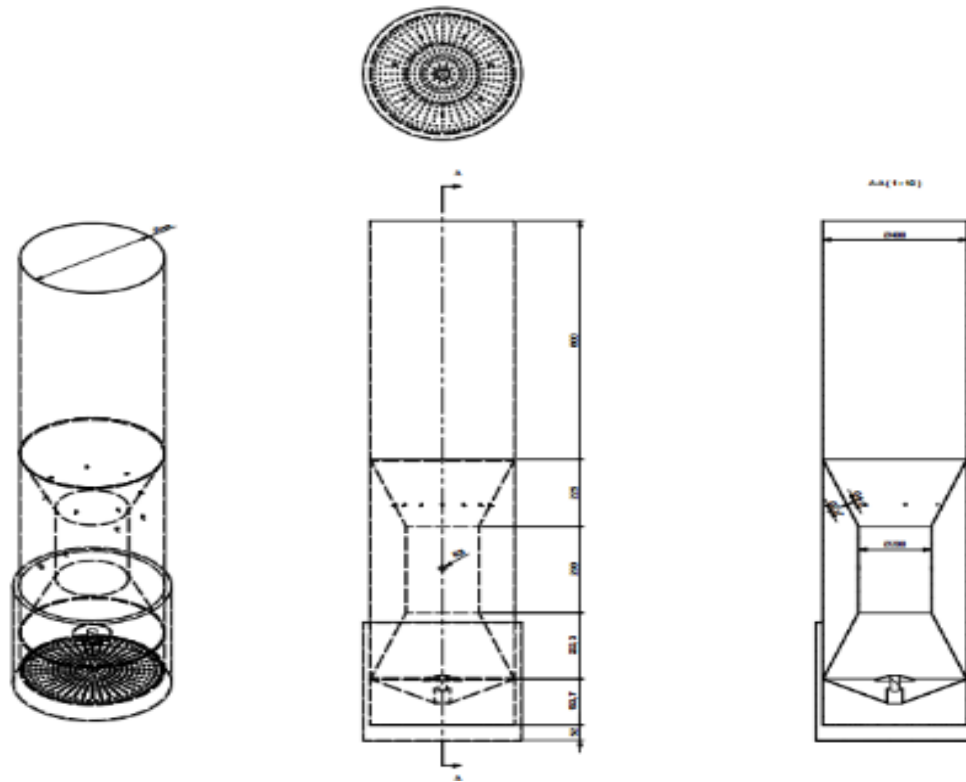


Figura 4. Dimensionado del gasificador
Fuente: Elaboración propia

En los datos experimentales de un reactor de lecho fluidizado y lecho burbujeante de Durán-García (2014), las dimensiones del reactor son: diámetro del lecho 0,4 m; diámetro de alimentación 0,6 m y altura 1,4 m. Estas mismas dimensiones fueron utilizadas para la gasificación del pino por Durán-García (2016).

En García-Valladolid (2017), se especifica dimensiones para: diámetro de la sección transversal del reactor de 0,224 m; altura mínima del lecho expandido 0,657 mm; altura de 2450 mm y diámetro externo de 228 mm.

En Randal (2017), las dimensiones del gasificador de flujo concurrente son: 95 cm de altura, 30 cm de diámetro externo, 15 cm de diámetro interno

Todos los reactores mencionados en los estudios anteriormente mencionados, son de forma cilíndrica y con especificaciones para las cuatro zonas diferenciadas para el proceso de gasificación.

En la figura 5 se evidencia el resultado de la modelación geométrica del gasificador, obtenida a través de la herramienta CAD, con las zonas diferenciadas.

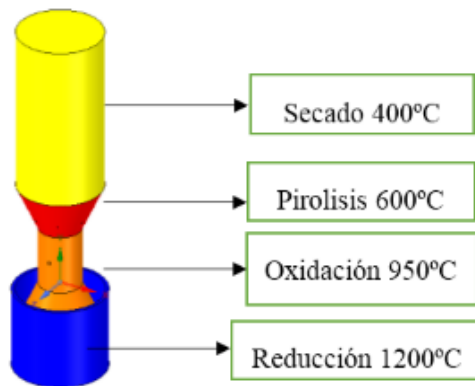


Figura 5. Zonas del proceso de gasificación
Fuente: Elaboración propia

En la gráfica se refleja el área superficial total que contiene el volumen y donde se observa un centro de volumen, construcción del eje con características similares al centro de volumen.

En comparación a los modelos señalados en SERI 1998; Sánchez, 2015; Ramírez, 2010 aún no especifican la propiedad del volumen de trabajo. Las especificaciones en cuanto al volumen del diseño del gasificador se observan en la tabla 11.

Tabla 11. Especificaciones volumétricas del gasificador

Área superficial total	4204527,0519 mm ²	
Centro de volumen	(-0.0013.499.7586, -0.0016) mm	
Volumen	175,987m ³	
Momento principal y eje	3372517720369,31 mm ⁵ (0, 1, 0)	
Momento principal y eje	54278333368003,1 mm ⁵ (0, 78118, 0, 0.62431)	
Momento principal y eje	54278520979347,2 mm ⁵ (-0,62431, 0, 0.78118)	
% de precisión relativa conocida	0,009	

Fuente: Elaboración propia

4.3. MALLADO Y MÉTRICA DE LA MALLA

Las entradas y salidas de flujo establecidas en el interior, se establecieron como cuerpos vacíos, con la finalidad de que el software de modelación reconozca estas áreas como límites físicos en la geometría. En el mallado se convirtieron los dominios de análisis en una malla poliédrica por recomendación del software para la simplificación geométrica que ayuda

notoriamente en la disminución del tiempo de procesamiento de datos; la figura 6 muestra la formación de malla para el volumen del gasificador.

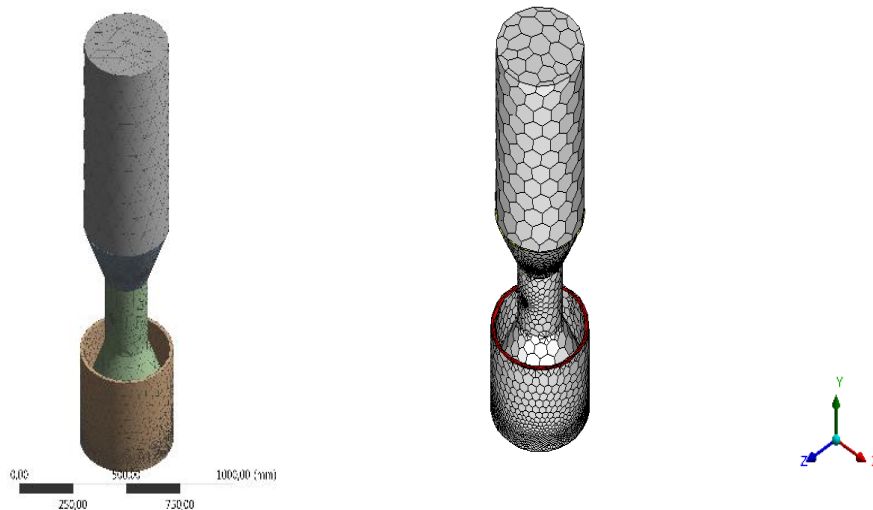


Figura 6. Mallado y métrica de volumen del gasificador
Fuente: Elaboración propia

En el mallado se determina el número de elementos necesarios para obtener una solución real del fenómeno. Un mallado con excesivo número de elementos implica el incremento en el tiempo de resolución y consumo de recursos obteniéndose el mismo resultado. Las especificaciones que determinan la calidad de la malla están reflejados en la tabla 12 exportadas del programa para verificación de proceso.

Tabla 12. Especificaciones de calidad de malla ingresada en el software

Details of “mesh”	
Smoothing	Low
Mesh Metric	Skewness
Min	5,8673e-006
Max	0,9757
Average	0,24504
Standard Devi..	0,1349

Fuente: Elaboración propia

4.4. CONDICIONES DE FRONTERA

Las especificaciones de las condiciones físicas de fronteras del dominio establecido se rigen al diseño del gasificador que consta de entradas de aire, gas y biomasa con una salida de

gases producidos. Las entradas para cada parámetro se ingresaron al programa para la simulación. La cantidad de flujo másico se encuentra en SERI (1998), capítulo 4, principios de la gasificación; establece el coeficiente de aire requerido para la gasificación, partiendo de las propiedades térmicas típicas de la biomasa; en una relación de 2,38 kg de biomasa/kg de aire. De la misma manera establece el aire requerido para la combustión en una relación de 1,15 kg de biomasa/kg de aire. Sabiendo que el flujo másico es de 110 kg/h se expresan los datos en la tabla 13.

Tabla 13. Valores para las condiciones de frontera, entradas.

Entorno	Flujo másico Kg/s	Temperatura °C
In aire	0,0128	200
In fuel	0,0016	723,65
In Pigüe	0,035	22

Fuente: Elaboración propia

En Rivera (2016), se plantea una expresión que permite calcular el aire necesario para la gasificación. Con la siguiente fórmula se calcula el aire estequiométrico necesario para la gasificación.

$$M_{af} = M_{da} \times ER \times M_f \quad (14)$$

ER: expresa el rendimiento de la gasificación y es el ratio entre el aire estequiométrico necesario y el actual. Siendo $ER < 1$ para la gasificación y pirolisis; específicamente para la gasificación este valor está entre 0,2-0,3. Con valores superiores a 0,25 los gases arden como consecuencia aumenta la temperatura; con valores inferiores a 0,25 no hay conversión completa de combustible a gas.

M_f : Representa el ratio de combustible a ingresar al gasificador.

$$M_{da} = 0,1153 C + 0,3434 (H - O/8) + 0,043 S$$

$$M_{da} = 0,1153 (51,79) + 0,3434 (4,32 - 42,58/8) = 1,56 \text{ kg aire seco/kg bms s}$$

$$M_{af} = (1,56) (0,25) (110) = 42,9 \text{ kg de aire} = 0,0119 \text{ kg/s}$$

En Randall (2017), utiliza la teoría expuesta por Sheth & Babu que indica que es necesario ingresar 1 kg de residuos madereros por cada 5,22 m³ de aire inyectado.

4.4.1. CARACTERIZACIÓN DE LA BIOMASA

Se ingresaron los datos que caracterizan a la biomasa del Pigüe, datos analizados mediante análisis aproximado, análisis elemental y calorimetría.

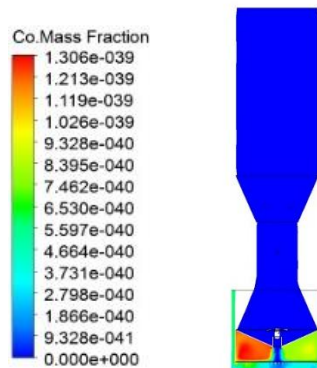
4.5. SIMULACIÓN DEL PROCESO DE GASIFICACIÓN

Los resultados obtenidos de la simulación de gasificación de la biomasa del Pigüe, se presentan en las siguientes gráficas.

4.5.1. MONÓXIDO DE CARBONO

La producción de monóxido de carbono, en fracción de masa de los gases al interior del gasificador, predicha por el *software* CFD se puede ver en la figura 7. Como se puede observar la concentración de CO, de 0%, llegando a 1,3%, debido a las temperaturas adecuadas, proporcionando energía de activación necesaria para producir las reacciones que permite el transporte de masa de la fase sólida a la gaseosa generando monóxido de carbono.

Figura 7. Variación de porcentaje de CO en el reactor.



Ramírez (2010), tiene un valor de 0,25 de fracción molar de CO; de la misma manera inicia en cero.

4.5.2. DIÓXIDO DE CARBONO

La producción de dióxido de carbono, en fracción de masa de los gases al interior del gasificador, predicha por el *software* CFD se puede ver en la figura 4.5. al igual que la del monóxido de carbono, este es un gas generado a partir del ingreso del aire en la zona de combustión, transportando carbono desde la fase sólida a la fase gaseosa. Además es notorio su acumulación en la zona de reducción. Como se puede observar en la figura 8 la presencia de reacción que presenta el CO₂ como reactivo y genera CO como producto.

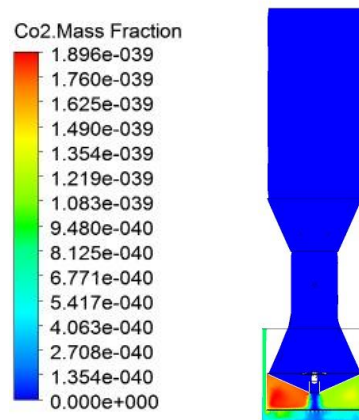


Figura 8. Variación de porcentaje de CO₂ en el reactor.

Ramírez (2010), el valor de concentración de CO₂ es de 0,14, donde se especifica que se realizó la simulación con biomasa pirolizada, justificando el nivel bajo de CO₂.

4.5.3. OXÍGENO

La fracción másica del oxígeno dentro del lecho como se puede ver en la figura 9, la mayor cantidad de este gas se encuentra en la zona donde no reacciona. La disminución de oxígeno se debe básicamente a que actúa solo como reactivo por lo tanto no está presente como producto en una reacción.

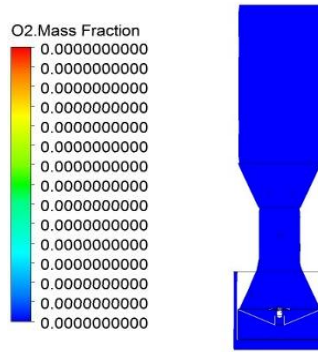


Figura 9. Variación de porcentaje de O₂ en el reactor

Ramírez (2010), encuentra un valor máximo de 0,21 e indica que la concentración de este gas se encuentra en las zonas no reacciona: pirolisis y secado.

4.5.4.TEMPERATURA

Se observa el comportamiento de la temperatura en el interior del lecho, se puede observar en la figura 10 que la máxima temperatura se encuentra en la zona de reducción que comprende temperaturas entre los 1000 y 1200°C donde ingresa el agente oxidante. Esto se debe a las reacciones exotérmicas presentes en dicha reacción generando la temperatura necesaria para dicho proceso

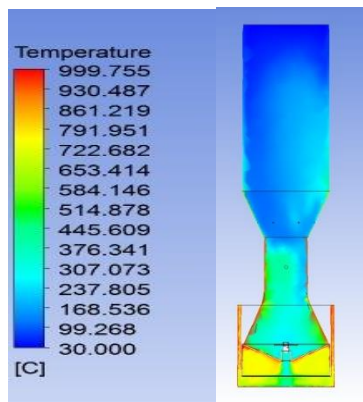


Figura 10. Variación de temperatura del proceso

Ramírez (2010), en su simulación registra un valor de temperatura máxima de 1728 K y una temperatura inicial de 293 K. Siendo la zona de donde el ingresa el agente oxidante la zona con mayor temperatura.

4.5.5. VELOCIDAD

El flujo de gas presente en el reactor se debe principalmente a la ventilación que genera el vacío necesario como se observa en la figura 11. Gracias a un dispositivo que genera la succión, la mayoría fluye en el sentido en que ingresa al lecho inferior al superior. Sin embargo es notable observar que la zona de combustión tiende a subir, debido a los gases provenientes en dicha zona tienen una densidad muy baja, por lo tanto suben hasta perder su temperatura en el vacío debido a la fuerza ascendente.

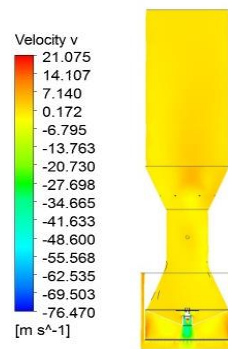


Figura 11. Variación de temperatura del proceso.

Ramírez (2010), registra una velocidad máxima de 0,47 m/s localizada en la zona de ingreso de aire.

4.5.6. ENERGÍA TOTAL

La energía total que se produce en la zona de reducción, es el resultado del proceso de desarrollo en las diferentes etapas de gasificación. Como se puede observar en la figura 12 la acumulación de energía está comprendida en valores 126910,563 J/Kg.

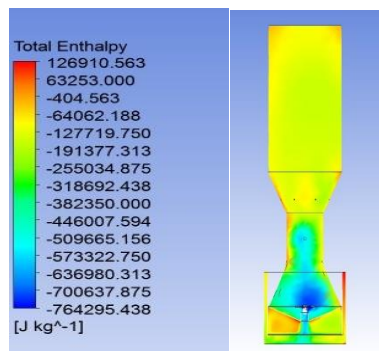


Figura 12. Energía total del proceso.

CONCLUSIONES

- Realizada la investigación se determinó que el tipo de gasificador empleado para la gasificación de *Piptocoma discolor* (Pigüe), es de tipo flujo descendente (*downdraft*). Considerando que son los únicos adecuados para aplicaciones a pequeña escala, utilizando un tamaño de partícula superior a 5 mm hasta los 100 mm. y consta de cuatro zonas diferenciadas que son: secado, pirolisis, oxidación y reducción.
- Se realizaron los análisis físico-químicos de la especie Pigüe, los mismos que fueron ingresado en el software computacional y permitió la simulación del proceso de gasificación.
- Se realizó la simulación del proceso de gasificación, consiguiendo fracciones molares de CO y CO₂ componentes básicos para su uso como gas combustible; y energía total de 126910,563 J/Kg y menores cantidades de emisiones.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda la realización del prototipo siguiendo las especificaciones desarrolladas en esta investigación, de manera que se pueda comprobar los resultados teóricos a una situación real con resultados tangibles.
- La gasificación de la biomasa es un proceso térmico con un alto potencial por lo que se recomienda implementar una planta piloto con base a los parámetros establecidos en la investigación de manera que se pueda cubrir las necesidades energéticas en plantas agroindustriales de baja y mediana escala, mediante la generación de energía eléctrica.
- Se recomienda el uso de la información y del software Ansys Fluent Academic para trabajos térmicos de la gasificación de diferentes tipos de combustibles biomásicos.

REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

- Aguiar-Trujillo, L., Márquez-Montesino, F., Ramos-Robaina, B. A., Arauzo-Pérez, J., Gonzalo-Callejo, A., & Sánchez-Cebrian, J. L. (2013). Gasificación con aire en lecho fluidizado de los residuos sólidos del proceso industrial de la naranja. *Ingeniería Mecánica*, 16(1), 41-51.
- Ahumada, L. M., Verdeza, A., Bula, A. J., & Lombana, J. (2016). Optimización de las Condiciones de Operación de la Micro-gasificación de Biomasa para Producción de Gas de Síntesis. *Información tecnológica*, 27(3), 179-188.
- ANSYS ®. ANSYS FLUENT theory guide [Internet]. Canonsburg; (2013).
- Balderrama-Castañeda, S., Luján-Álvarez, C., Lewis, D. K., Ortega-Gutiérrez, J. A., de Jong, B. H., & Nájera-Ruiz, T., (2011). Factibilidad de generación de electricidad mediante gasificación de residuos de aserradero en el norte de México. *Madera y bosques*, 17(2), 67-84.
- Borge, D. (2007), Estudio y caracterización del proceso de devolatilización de biomasa lignocelulósica para tamaños de 2 a 19 mm, proyecto de fin de carrera, Universidad de Valladolid.
- Chen, D.; Li, M.; Zhu, X. TG-DSC (2012) method applied to dryng characteristics and heat requirement of cotton stalk during drying. *Heat and Mass Transfer*, 48 (12), 2087-2094.
- de Energía, F. D. L. C. Renovable para América Central, FOCER 2002. *Manual sobre energía renovable. BIOMASA. Users Network (BUN-CA), 1.*
- Durán-García, M. (2016). GASIFICACIÓN DEL ASERRÍN DE PINO (*Pinus arizonica*) EN UN REACTOR DE LECHO FLUIDIZADO: ANÁLISIS DE LAS VARIABLES DEL PROCESO. *Maderas. Ciencia y Tecnología*, 18 (4), 633-650.
- Durán-García, M. E. 2016. Gasificación del aserrín de pino (*Pinus arizonica*) en un reactor de lecho fluidizado: Análisis de las variables del proceso. *Maderas. Ciencia y tecnología*, 18(4), 633-650.

- Echeverría Cruz, M. A., Mena, L., & Antonio, O. (2010). *Caracterización energética de la cascarilla de arroz para su aplicación en la generación de energía termoeléctrica* (Bachelor's thesis, QUITO/EPN/2010).
- Erazo, G., Izurieta, J. C., Cronkleton, P., Larson, A., y Putzel, L. (2014). El uso de pigüe (Piptocoma discolor) por los pequeños productores de Napo, Ecuador: Manejo sostenible de una especie pionera de madera para los medios de vida locales. (Vol. 26): CIFOR.
- Esantes, J. y Lapuerta, M. 1991, Fundamentos de combustión, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia.
- Estrada, C. A., & Meneses, A. Z. (2004). Gasificación de biomasa para producción de combustibles de bajo poder calorífico y su utilización en generación de potencia y calor. *Scientia et technica*, 2(25).
- F.S. Vargas, C. Guerrero, J. Arango, Tecnologías para el aprovechamiento de los Biocombustibles, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. 2008.
- Fernández, J. (2003). *Energía de la biomasa*. Haya Comunicación.
- Focer. (2001). Manual sobre energía renovable: BIOMASA. Casa editorial. Ciudad de edición, Costa Rica.
- Fonseca Cuenca, E. G., Tingo, T., & Fernando, L. (2011). *Desarrollo de un Proceso Tecnológico para la Obtención de Briquetas de Aserrín de Madera y Cascarilla de Arroz, y Pruebas de Producción de Gas Pobre* (Bachelor's thesis, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo).
- Forero Núñez, C. A., Castellanos Contreras, J. U., & Sierra Vargas, F. E. (2013). Control de una planta prototipo de gasificación de biomasa mediante redes neuronales. *Ingeniería mecánica, tecnología y desarrollo*, 4(5), 161-168.
- García García, V. (2014). *Caracterización de la transferencia de calor pared-lecho y análisis del efecto de la compresibilidad del gas en un lecho fluidizado mediante simulación CFD* (Master's thesis).

- García Valladolid, R. I. (2017). Desarrollo de metodología para validación experimental de un gasificador de lecho fluidizado burbujeante.
- García, M. D. (2014). Reactores de lecho fluidizado y lecho burbujeante en la gasificación de biomasa residual. *Fuentes: El reventón energético*, 12(2), 5.
- Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal del Cantón Pastaza. (2015) Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial del Cantón Pastaza 2015 -2020.
- Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal del Cantón Pastaza. (2012). Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial 2012-2015. Puyo.
- Grijalva Jorge, C. X., Ramos Raúl, Barrera Paulo, Limorgi Ricardo. (2012). *Situación de los Recursos Genéticos Forestales en el Ecuador*. Recuperado de: http://www.iniap.gob.ec/nsite/images/stories/descargas/informe_pas_rgf_ecuador_final_.pdf. Visitado el: 12 de marzo del 2016.
- Merino Castillo, J. P. (2011). *Estudio Económico de dos formas de aprovechamiento forestal del pigue (Piptocoma discolor) en el cantón Mera, provincia de Pastaza*. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba. Recuperado de: https://scholar.google.com/ec/scholar?q=Estudio+Econ%C3%B3mico+de+dos+formas+de+aprovechamiento+forestal+del+pigue+%28piptocoma+discolor%29+en+el+cant%C3%B3n+Mera%2C+provincia+de+Pastaza&btnG=yhl=esyas_sdt=0%2C5.
- Heraz Segura, A. (2012). *Estudio de gasificación mediante un prototipo experimental para el tratamiento termoquímico de residuos orgánicos* (Master's thesis, Universidad Iberoamericana Ciudad de México. Departamento de Ingeniería y Ciencias Químicas).
- Hirka, I., Konrad, M., & Hrabovsky, M. Modelling of Gasification of Wooden Particles by Steam Plasma Jet in Thermal Plasma Reactor.
- IEA Energy Technology Essentials. 2007. Biomass for Power Generation and CHP.
- IEA, CO₂ emissions from fuel combustion Highlight, 2011.
- INEC. (2010). CENSO POBLACION Y VIVIENDA

- Jenkis, B., Baxter, L., Miles, T. y Miles, T. (1998), Combustion properties of biomass, *Fuel Processing Technology* 54, 17-46
- Lapuerta, M., Rodríguez, J. y Hernández, J. (2004), Kinetics of devolatilisation of forestry wastes from thermogravimetric analysis, *Biomass and Bioenergy* 27, 385-391.
- Luan, Y. T., Chyou, Y. P., & Wang, T. (2013). Numerical analysis of gasification performance via finite-rate model in a cross-type two-stage gasifier. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 57(2), 558-566.
- Machado, C. (2010). Situación de los Biocombustibles de 2da y 3era Generación en América Latina y Caribe. *Organizacion Latinoamericana de Energia OLADE, Instituto Interamericano de Cooperacion para la Agricultura IICA*, 55-71.
- Mandl, C., Obernberger, I., & Biedermann, F. (2010). Modelling of an updraft fixed-bed gasifier operated with softwood pellets. *Fuel*, 89(12), 3795-3806.
- Márquez-Montesino, F., Cordero-Alcántara, T., Rodríguez-Mirasol, J., & Rodríguez-Jiménez, J. J. (2001). Estudio del potencial energético de biomasa de *Pinus caribaea*, 83-89.
- Martínez, S. (2009). Evaluación de la biomasa como recurso energético renovable en Cataluña. *España. Universitat de Girona*, 185.
- McKendry, P. (2002a), Energy production fro biomass (p. 1): overview of biomass, *Bioresource Tecnology* 83, 37-46
- McKendry, P. (2002b), Energy produccion fro biomass (p. 2): conversion technologies, *Bioresource Tecnology* 83, 55-63
- Mena Pachano, A. (2014). *El desarrollo de la energía renovable en el Ecuador*. Corporación para la Investigación Energética. Recuperado de:<http://www.energia.org.ec/cie/>. Visitado el: 20 de marzo del2016.
- Mendoza, J. M., Bula, A. J., Gómez, R. D., & Corredor, L. A. (2012). Análisis energético de la gasificación de biomasa. *Información tecnológica*, 23(5), 85-96.
- N. Lior, (2010) Sustainable energy development: The present (2009) situation and possible paths to the future, *Energy*, 35 3976-3994.

- Núñez, C. A. F., Fajardo, C. A. G., & Vargas, F. E. S. (2012). Producción y uso de pellets de biomasa para la generación de energía térmica: una revisión a los modelos del proceso de gasificación. *Iteckne*, 9(1), 21-30.
- Parikh, J., Channiwala, S. y Ghosal, G. (2005), A correlation for calculating HHV from proximate analysis of solid fuels, *Fuel* 84, 487-494.
- Peña, Santiago. (2016). PROCESOS TERMOQUÍMICOS DE LA MADERA Y EN GENERAL DE LA BIOMASA. 10.13140/RG.2.2.21490.50889.
- Pérez, J. (2006). Estudio del proceso de gasificación de biomasa lignocelulósica mediante trabajos teórico experimentales, trabajo de investigación, Universidad de Valladolid.
- Pérez, J. (2009). Gasificación de la biomasa. Estudios teóricos-experimentales en lecho fijo equicorriente.
- Pinedo, A. U. (2013). Obtención de biocarbones y biocombustibles mediante pirólisis de biomasa residual. *Universidad Nacional de Educación a Distancia, Facultad de Ciencias*.
- Prins, M. J. (2005). *Thermodynamic analysis of biomass gasification and torrefaction* (p. 164). Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven.
- Pujoldevall Sánchez de Toledo, O. (2015). *Diseño y construcción de un sistema de generación eléctrica mediante gasificación de biomasa* (Bachelor's thesis, Universitat Politècnica de Catalunya).
- Ramírez, S., (2010), Simulación computacional del proceso de gasificación de biomasa en el reactor de lecho fijo de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Colombia. Universidad Nacional de Colombia.
- REN21, Renewables 21011 Global Status Report, 2011.
- Rivera Cueva, H. (2016). Estudio de viabilidad técnica y económica de una planta de gasificación de biomasa para obtener gas de síntesis.
- Rodríguez, R. A., Saffe, M. A., Costante, M., Plana, Y., Palacios, C., & Echegaray, M. (2013). Gasificación de residuos agroindustriales: predicción del comportamiento de distintos contaminantes. *Ciencia, docencia y tecnología*, (47), 161-185.

- Romo Ortega, N., Toro, A. F., Flores Pardo, L. M., & Cañas Velasco, A. (2011). Evaluación de las propiedades fisicoquímicas y térmicas de tallos de café y su análisis económico para la producción de pellets como biocombustible sólido. *Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente*, (10).
- Rutiaga, J., y Carrillo, A. Distribución granulométrica en subproductos de aserrío para su posible uso en pellets y briquetas. Scielo, 1-12. 2014
- Sánchez, O., (2015), “Diseño y construcción de un sistema de generación mediante gasificación de biomasa”. TFG presentado para optar al título de grado en Ingeniería de la Energía. Departamento de Ingeniería Eléctrica. Universidad Politécnica de Catalunya. Barcelona.
- SERI, (1998) Solar Energy Research Institute. Handbook of Biomass Downdraft Gasifier Engine Systems SERI/SP-271-3022 DE88001135. March 1988 UC Category: 245.
- Serrano Ayuso, L. Ó. (2009). *Producción de carbón vegetal mediante carboneras en zonas rurales empobrecidas* (Master's thesis).
- Sims, R. (2002), *The brilliance of bioenergy in business and in practice*, James and James, Reino Unido
- Valter Francescato, E. A., & Zucconi Bergomi, L. (2008). Manual de combustibles de la Madera. *AVEBIOM. Valladolid*.
- Vega-Nieva, D. J., Fernández Lorenzo, M., Ortiz Torres, L., & Corral-Rivas, J. J. (2015). Caracterización bioenergética de los residuos de cosecha de las principales especies forestales del noroeste de España. *Información tecnológica*, 26(4), 03-12.