

# VALORIZACIÓN ENERGÉTICA DE LA GUADUA ANGUSTIFOLIA KUNTH MEDIANTE PROCESOS TERMOQUÍMICOS



## TESIS DOCTORAL

Cristian Rolando Ardila Pérez

Oviedo España - Abril de 2019

Programa de Doctorado: Energía y Control de Procesos



Universidad de Oviedo  
*Universidá d'Uviéu*  
*University of Oviedo*





## RESUMEN DEL CONTENIDO DE TESIS DOCTORAL

### 1.- Título de la Tesis

Es	ol/Otro	Ing	
Va	zación	En	valorization of Guadua
Angustifolia Kunth	mediante procesos	An	ifolia Kunth by thermochemical
úimicos			

### 2.- Autor

Nombre: Cristian Rolando Ardila Pérez DNI/Pasaporte/NIE:

Programa de Doctorado  
 Eñía Control de Procesos  
 no responsable:  
 Comisión Académica del Programa de Doctorado en Eñía Control de Procesos

### RESUMEN (en español)

gran interés, ya que p  
 utilización en las indu a unas í  
 de la c i

necesidad de volver a sembrar más plantas. Esto lo convierte en un sistema natural y  
 eficiente de fij de grandes cantidades de CO2. U esta  
 puede llegar a r hasta los 30 metros de altura co menos  
 de 5 años.

La transformación del bambú Guadua Angustifolia Kunth en un combustible versátil, del  
 líq te), para ser empleado en res de combustión o  
 cia a una clara forma de utiliz de este material para la

centra en la caracterización de este tipo de  
 ue su izació ergética  
 a ll a c u aná químico

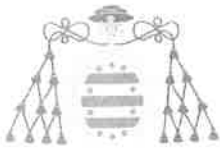
y min  
 ante l . Se ha  
 ón de hace

viable su utilización como combustible en comunidades rurales y de escasos recursos  
 en Colombia, donde la Guadua Angustifolia es e cto vegeta nante  
 en la m ría de sus idades. res adic autor ha c o la  
 conces de una pa de mod utilidad por parte erno

Dicha patente corresponde al diseño de un reactor de gas de c  
 múltiple que permite realizar el proceso a voluntad en corriente ascendente,  
 descendente o corriente cruzada.

De los análisis realizados se deduce que la Guadua tiene una composición elemental, un  
 poder cal íco y una com ción estructural similar al resto de bio s de tipo  
 lignocelu cas, con la pa laridad de presentar altas concentraci de los  
 lementos mayoritarios K y S

La Guadua Angustifol Kunth presenta características muy adecuadas para ser  
 leada como materi en de transformación te ica tales como



la pirólisis o gasificación, que permitan obtener a partir de la misma combustibles líquidos o gaseosos. Por lo tanto, este tipo de biomasa lignocelulósica puede considerarse una seria alternativa para la mitigación de las carencias energéticas existentes en comunidades rurales colombianas, en las que este recurso presenta una gran disponibilidad.

#### RESUMEN (en Inglés)

Biomass as an energy source has many advantages over the use of fossil fuels. Thus, lignocellulosic biomass has a great potential for its energy use, due to its great availability on the planet.

Among lignocellulosic biomass, bamboo *Guadua Angustifolia* Kunth has a great interest, since its physico-chemical characteristics are ideal for its use in the construction, furniture, paper, textile, food and chemical industries as well as handicrafts. Another little-explored potential of *Guadua* is its use as energy source, because this plant offers rapid growth, adaptability to different terrains, little crop maintenance and has a regenerative mechanism of self-propagation that, once the crop is established, guarantees a permanent supply of biomass without the necessity of re-planting. Thus, its cultivation may constitute a natural and efficient system for fixing large amounts of CO<sub>2</sub>. Once the *Guadua* sprouts, it can grow up to 30 meters high with diameters up to 25 cm in less than 5 years.

The transformation of bamboo *Guadua Angustifolia* Kunth into a versatile fuel (gaseous fuel or bio-oil) to be used in combustion engines or special reactors constitutes a way of using this material for power generation.

This thesis focuses on the characteristics of this type of bamboo, *Guadua Angustifolia* Kunth, in relation to its energy recovery through thermochemical processes. Thus, its chemical characterization (proximate analysis, ultimate analysis, major and minor element concentrations and lignocellulosic composition) has been carried out. Also, its behavior during pyrolysis and combustion has been studied. A prototype of low-cost gasification reactor has been developed. This reactor makes *Guadua* use viable as a fuel in rural and low-income communities in Colombia, where this type of bamboo is the predominant vegetable product in most economic activity. As an additional result this thesis resulted in a patent being granted to the author by the Colombian Government. This patent consists of the design of a multi-configuration gasification reactor that allows the process to be carried out in three different configurations, updraft, downdraft and crossdraft.

From the performed analyses, it can be deduced that the *Guadua* has an elemental composition, a heating value and a structural composition similar to the rest of lignocellulosic type biomasses, with high concentrations of the major elements K and Si. The *Guadua Angustifolia* Kunth presents very suitable characteristics to be used as a combustible material in thermochemical transformation processes, such as pyrolysis or gasification, producing liquid or gaseous fuels. Therefore, this type of lignocellulosic biomass can be considered a serious alternative for the mitigation of energy deficiencies in rural Colombian communities, where this resource is highly available.

SR. PRESIDENTE DE LA COMISIÓN ACADÉMICA DEL PROGRAMA DE DOCTORADO  
EN ENERGÍA Y CONTROL DE PROCESOS

# VALORIZACIÓN ENERGÉTICA DE LA GUADUA ANGUSTIFOLIA KUNTH MEDIANTE PROCESOS TERMOQUÍMICOS

## TESIS DOCTORAL

Cristian Rolando Ardila Pérez

Oviedo España - Abril de 2019

Programa de Doctorado: Energía y Control de Procesos

Directores de Tesis:

Dr. Francisco Javier Fernández García

Dra. María Belén Folgueras Díaz

Universidad de Oviedo

Departamento de Energía



Universidad de Oviedo  
*Universidá d'Uviéu*  
*University of Oviedo*



*A mi madre Alicia por su cariño e incondicional apoyo, por enseñarme con su ejemplo que la disciplina y la perseverancia son las llaves de las puertas del éxito.*

*A mi hermano Gustavo por estar siempre pendiente, por brindarme su respaldo en los momentos difíciles*

*A Candelaria mi mujer, por cuidar de mis hijas Carolina y Camila en las largas noches de estudio.*

*A mis hermanos Hirvin y Rodrigo por su voz de aliento y su confianza en mí.*

*A Dios por darme a mi familia.*

## AGRADECIMIENTOS

*Agradezco al Profesor Francisco Javier Fernández García mi director de tesis, por guiarme en este proceso, por su confianza en mis ideas y por ayudarme a centrar mis esfuerzos en el cumplimiento de este objetivo.*

*A la Profesora María Belén Folgueras Díaz por respaldar mi Tesis con su conocimiento químico, por el tiempo de apoyo a mis consultas y por sus amables gestos de confianza en mi proyecto.*

*Agradezco a la Universidad de Oviedo y a los profesores del Departamento de Energía, con los que hace 7 años realicé la Maestría en Ingeniería Energética. Título que me permitió enrutarme en los caminos de la investigación y que ha sido determinante en mi crecimiento personal.*

*A todos ustedes muchas gracias.*

## RESUMEN DE LA TESIS DOCTORAL

La biomasa como fuente de energía presenta múltiples ventajas frente a la utilización de combustibles fósiles. Así, la biomasa de tipo lignocelulósico presenta un gran potencial para su aprovechamiento energético, debido a su gran disponibilidad en el planeta.

Entre la biomasa de tipo lignocelulósico, el bambú *Guadua Angustifolia Kunth* posee un gran interés, ya que presenta unas características físico-químicas ideales para su utilización en las industrias de la construcción, muebles, papel, textil, alimentación, química y artesanía. Otro gran potencial poco explorado, es su utilización como fuente de energía, debido a que esta planta presenta un rápido crecimiento, una alta adaptabilidad a diferentes terrenos, unas bajas necesidades de mantenimiento en el cultivo y dispone de un mecanismo de auto-propagación regenerativa que garantiza que, una vez establecido el cultivo, se disponga de un suministro permanente de biomasa sin necesidad de volver a sembrar más plantas. Esto lo convierte en un sistema natural y eficiente de fijación de grandes cantidades de CO<sub>2</sub>. Una vez que la *Guadua* brota, esta puede llegar a crecer hasta los 30 metros de altura con diámetros hasta 25 cm en menos de 5 años.

La transformación del bambú *Guadua Angustifolia Kunth* en un combustible versátil, del tipo gaseoso o líquido (bio-aceite), para ser empleado en motores de combustión o reactores especiales, representa una clara forma de utilización de este material para la generación de energía.

La investigación planteada en esta Tesis se centra en la caracterización de este tipo de bambú, *Guadua Angustifolia Kunth*, y en el estudio de las posibilidades que ofrece su valorización energética mediante procesos termoquímicos. Así, se ha llevado a cabo su análisis químico (inmediato, elemental, de elementos mayoritarios y minoritarios y composición estructural), el estudio de su comportamiento durante la pirolisis y la combustión y se ha desarrollado un

prototipo de reactor de gasificación de bajo coste. Dicho reactor hace viable su utilización como combustible en comunidades rurales y de escasos recursos en Colombia, donde la Guadua Angustifolia Kunth es el producto vegetal predominante en la mayoría de sus actividades.

La actividad investigadora de esta Tesis dio como resultado la concesión de una patente al autor de la misma por el Gobierno colombiano. Dicha patente corresponde al diseño de un reactor de gasificación de configuración múltiple que permite realizar el proceso a voluntad en corriente ascendente, descendente o corriente cruzada, unificando en un solo dispositivo las ventajas de cada una de estas configuraciones.

También ha surgido una publicación en la revista “Energy Procedia”, en la que se estudiaron los compuestos líquidos obtenidos por pirolisis rápida de la Guadua Angustifolia Kunth.

A lo largo del desarrollo de la Tesis, se realizó una estancia en un centro de investigación de la construcción y la madera en Bogotá (Colombia), participando como investigador en proyectos de tipo energético, en los que se construyeron varios reactores para gasificación y combustión para Guadua Angustifolia y se realizaron pruebas para el aprovechamiento de su energía química.

Asimismo, el autor recibió la categoría de Investigador Junior y evaluador reconocido por el Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación (Colciencias), que es el principal organismo de la administración pública colombiana encargado del fomento de la ciencia, la tecnología y la innovación.

Finalmente, como resultado de los conocimientos adquiridos durante la realización de esta Tesis Doctoral, se proponen dos futuras líneas de investigación. Una encaminada a la utilización de los gases de combustión de la Guadua para la carbonatación inducida de tableros de Guadua - Cemento Expansivo y, la otra, orientada al diseño y construcción de un reactor para la obtención de bio-aceite a partir de la pirolisis de la Guadua Angustifolia Kunth. En esta última, para evaluar



la viabilidad de la Guadua como alternativa para la generación de electricidad con motores de combustión interna en comunidades rurales de Colombia, es preciso llevar a cabo un estudio de evaluación técnico - económico.

## ABSTRACT

Biomass as an energy source has many advantages over the use of fossil fuels. Thus, lignocellulosic biomass has a great potential for its energy use, due to its great availability on the planet.

Among lignocellulosic biomass, bamboo *Guadua Angustifolia* Kunth has a great interest, since its physico-chemical characteristics are ideal for its use in the construction, furniture, paper, textile, food and chemical industries as well as handicrafts. Another little-explored potential of *Guadua* is its use as energy source, because this plant offers rapid growth, adaptability to different terrains, little crop maintenance and has a regenerative mechanism of self-propagation that, once the crop is established, guarantees a permanent supply of biomass without the necessity of re-planting. Thus, its cultivation may constitute a natural and efficient system for fixing large amounts of CO<sub>2</sub>. Once the *Guadua* sprouts, it can grow up to 30 meters high with diameters up to 25 cm in less than 5 years.

The transformation of bamboo *Guadua Angustifolia* Kunth into a versatile fuel (gaseous fuel or bio-oil) to be used in combustion engines or special reactors constitutes a way of using this material for power generation.

This thesis focuses on the characteristics of this type of bamboo, *Guadua Angustifolia* Kunth, in relation to its energy recovery through thermochemical processes. Thus, its chemical

characterization (proximate analysis, ultimate analysis, major and minor element concentrations and lignocellulosic composition) has been carried out. Also, its behavior during pyrolysis and combustion has been studied and a prototype of low-cost gasification reactor has been developed. This reactor makes Guadua use viable as a fuel in rural and low-income communities in Colombia, where this type of bamboo is the predominant vegetable product in most economic activity.

The research for this thesis resulted in a patent being granted to the author by the Colombian Government. This patent consists of the design of a multi-configuration gasification reactor that allows the process to be carried out in three different configurations (updraft, downdraft and crossdraft), a single device unifying the advantages of each of these configurations.

An article has also been published in the journal "Energy Procedia", in which the liquid compounds obtained by fast pyrolysis of *Guadua Angustifolia Kunth* were studied.

Throughout the development of the thesis, the author enjoyed a stay at the Construction and Wood Research Center in Bogotá (Colombia), where he worked as a researcher in energy projects. In these projects, several reactors for Guadua gasification and combustion were built and tests to take advantage of its chemical energy were carried out.

Likewise, the author attained the categories of Junior Researcher and evaluator recognized by the Administrative Department of Science, Technology and Innovation (Colciencias), which is the main body of the Colombian public administration in charge of the promotion of science, technology and innovation.

Finally, as a result of the knowledge acquired in the production of this doctoral thesis, two future lines of research are proposed, one aimed at the use of the combustion gases from Guadua for the induced carbonation of construction boards of Guadua – expansive concrete, and the second oriented to the design and construction of a reactor for obtaining bio-oil from the pyrolysis of

Guadua Angustifolia Kunth. In the latter, to study the Guadua viability of power generation by internal combustion engines in rural communities of Colombia, a techno-economic assessment is needed.

## ÍNDICE

<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>18</b>
Generalidades de la Guadua Angustifolia Kunth en Colombia.....	19
Partes de la Guadua Angustifolia Kunth .....	21
Carencias energéticas en comunidades colombianas. ....	23
<b>MOTIVACIÓN DE LA TESIS .....</b>	<b>23</b>
<b>OBJETIVOS DE LA TESIS.....</b>	<b>24</b>
<b>ESTRUCTURA DE LA TESIS.....</b>	<b>25</b>
<b>CARACTERIZACIÓN DE LA GUADUA ANGUSTIFOLIA KUNTH.....</b>	<b>27</b>
Análisis Inmediato .....	28
Análisis Elemental .....	29
Composición estructural de la biomasa .....	31
Poder Calorífico .....	34
Determinación de elementos mayoritarios de la Guadua Angustifolia Kunth.....	38
Determinación de los elementos minoritarios de la Guadua Angustifolia Kunth.....	39
<b>ANÁLISIS TERMOGRAVIMÉTRICO DE LA PIRÓLISIS DE LA GUADUA ANGUSTIFOLIA .....</b>	<b>41</b>
Pirólisis de la biomasa .....	43
Ensayo de pirólisis convencional de la Guadua Angustifolia Kunth.....	44
Curva Termogravimétrica (TG) - Pirólisis Guadua Angustifolia Kunth .....	45
Curva Derivada Termogravimétrica (DTG) - Pirólisis Guadua Angustifolia Kunth.....	47
Curva Análisis Térmico Diferencial (DTA) - Pirólisis Guadua Angustifolia Kunth.....	48
Temperaturas de descomposición la Guadua Angustifolia mediante pirólisis.....	48
Determinación de la energía de activación en la pirólisis de la Guadua Angustifolia Kunth.....	51
Compuestos presentes en los gases de la pirólisis de la Guadua Angustifolia Kunth.....	58
<b>ANÁLISIS TERMOGRAVIMÉTRICO DE LA COMBUSTIÓN DE LA GUADUA ANGUSTIFOLIA.....</b>	<b>63</b>
Combustión de Biomasa .....	64
Ensayo de combustión de la Guadua Angustifolia Kunth .....	65
Curva Termogravimétrica (TG) - Combustión Guadua Angustifolia Kunth .....	66
Curva Derivada Termogravimétrica (DTG) - Combustión Guadua Angustifolia Kunth .....	67
Curva Análisis Térmico Diferencial (DTA) - Combustión Guadua Angustifolia Kunth .....	68
Temperaturas características de la combustión de la Guadua Angustifolia.....	69
Determinación de la energía de activación en la combustión de la Guadua Angustifolia Kunth (2,5 °C/min)...	73
Gases producto de la combustión de la Guadua Angustifolia Kunth.....	78

<b>COMPOSICIÓN DEL COMBUSTIBLE LÍQUIDO OBTENIDO MEDIANTE PIRÓLISIS RÁPIDA DE LA GUADUA ANGUSTIFOLIA KUNTH .....</b>	<b>82</b>
Pirólisis Rápida (Fast Pyrolysis).....	83
Ensayo de pirólisis rápida de la Guadua Angustifolia Kunth.....	83
Principales gases condensables obtenidos de la Guadua Angustifolia por pirólisis rápida.....	84
<b>GASIFICACIÓN DE BIOMASA LIGNOCELULÓSICA “GUADUA ANGUSTIFOLIA KUNTH” .....</b>	<b>91</b>
Biomasa Lignocelulósica.....	92
Proceso de Gasificación.....	93
Reacciones típicas de la gasificación .....	95
Agentes Gasificantes .....	96
Etapas generales de un sistema básico para gasificación de biomasa.....	97
Gasificación en Corriente Ascendente y Descendente. ....	99
Gasificación de Guadua Angustifolia Kunth en corriente ascendente y descendente .....	108
Gasificador para Guadua Angustifolia en corriente descendente (tapa abierta o núcleo abierto). ....	109
Gasificador para Guadua Angustifolia en corriente ascendente .....	113
Estimación de la composición de los gases de gasificación de la Guadua Angustifolia y su PCI .....	115
Componentes adicionales para un sistema de gasificación de Guadua Angustifolia.....	119
<b>DISEÑO DE UN REACTOR DE GASIFICACIÓN CORRIENTE ASCENDENTE PARA COMBUSTIÓN DIRECTA .....</b>	<b>123</b>
Gasificador corriente ascendente para combustión directa .....	124
Prototipo Diseñado .....	126
Condiciones de granulometría de la Guadua Angustifolia a ser utilizada en el reactor.....	128
Funcionamiento del reactor de gasificación en corriente ascendente y combustión directa. ....	131
Funcionamiento del sistema de remoción de cenizas .....	132
Intercambiador de calor para trabajar con el reactor de gasificación y combustión directa. ....	134
<b>REACTOR DE GASIFICACIÓN DE CONFIGURACIÓN MÚLTIPLE PARA BIOMASA (GUADUA ANGUSTIFOLIA KUNTH).....</b>	<b>136</b>
Reactor de Gasificación de Configuración Múltiple para Biomasa (Guadua Angustifolia Kunth).....	137
Descripción de la Invención.....	138
Modo de utilización.....	141

<b>PRUEBAS EXPERIMENTALES Y FUTURAS INVESTIGACIONES PARA LA GUADUA ANGUSTIFOLIA KUNTH.....</b>	<b>144</b>
Etapa Experimental.....	145
Evaporación de agua de mar utilizando Guadua Angustifolia como combustible .....	145
Futuras investigaciones para la Guadua Angustifolia Kunth .....	153
1. Utilización de los gases de combustión de la Guadua para carbonatación inducida de tableros Guadua- Cemento. ....	153
2. Diseño y construcción de un reactor para la obtención de bio-aceite a partir de la Guadua Angustifolia Kunth.....	155
 <b>CONCLUSIONES .....</b>	 <b>156</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>160</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>177</b>
Anexo 1. Artículo publicado en la revista Energy Procedia .....	178
Anexo 2. Comunicación para congreso ICEER 2019 (Aveiro, Portugal).....	184
Anexo 3. Resolución otorgamiento de patente modelo de utilidad .....	190
Anexo 4.1. Imágenes ilustrativas del modelo 3D del reactor de gasificación para combustión directa de Guadua Angustifolia.....	194
Anexo 4.2. Imágenes ilustrativas del modelo 3D del sistema de remoción de cenizas del reactor de combustión directa para Guadua Angustifolia. ....	195
Anexo 4.3. Detalles del modelo propuesto para seccionado de Guadua Angustifolia .....	196

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.1</b> Guadua Angustifolia utilizada en construcción.....	19
<b>Figura 1.2</b> Guadua Angustifolia utilizada en Muebles y Artesanías. ....	20
<b>Figura 1.3</b> Partes de la Guadua Angustifolia. Fuente: adaptado de .....	21
<b>Figura 3.1</b> Curva TG – Pirólisis Guadua Angustifolia Kunth. ....	45
<b>Figura 3.2</b> Curva DTG- Pirólisis Guadua Angustifolia Kunth. ....	47
<b>Figura 3.3</b> Curva DTA- Pirólisis Guadua Angustifolia Kunth. ....	48
<b>Figura 3.4</b> Curva TG y grado de conversión de la pirólisis de la Guadua Angustifolia.....	52
<b>Figura 3.5</b> Rectas energía de activación y factor pre-exponencial de la pirólisis de la Guadua Angustifolia .....	54
<b>Figura 3.6</b> Energía de activación de la pirólisis de la Guadua Angustifolia.....	56
<b>Figura 3.7</b> Energía de activación de la pirólisis de varios tipos de biomasa. ....	56
<b>Figura 3.8</b> Curvas DTG a 4 velocidades de calentamiento para la pirolisis de la Guadua Angustifolia.....	57
<b>Figura 3.9</b> Gases obtenidos a partir de la pirólisis de la Guadua Angustifolia Kunth. (compuestos 1 a 6) .....	60
<b>Figura 3.10</b> Gases obtenidos a partir de la pirólisis de la Guadua Angustifolia Kunth (compuestos 7 a 12). ....	61
<b>Figura 3.11</b> Gases obtenidos a partir de la pirólisis de la Guadua Angustifolia Kunt (compuestos 13 a 14). ....	62
<b>Figura 4.1</b> Curva TG - Combustión de la Guadua Angustifolia Kunth.....	66
<b>Figura 4.2</b> Curva DTG- Combustión de la Guadua Angustifolia Kunth.....	67
<b>Figura 4.3</b> Curva DTA- Combustión de la Guadua Angustifolia Kunth.....	68
<b>Figura 4.4</b> Perfil de combustión de la Guadua Angustifolia Kunth. ....	70
<b>Figura 4.5</b> Perfiles de combustión del bagazo de caña de azúcar.....	71
<b>Figura 4.6</b> Perfil de combustión de carbones colombianos (Cerrejón, Yolanda) e inglés (Thoresby).....	72
<b>Figura 4.7</b> TG y grado de conversión de combustión de la Guadua Angustifolia .....	75
<b>Figura 4.8</b> Curva DTG de la combustión de la Guadua Angustifolia Kunth. ....	76
<b>Figura 4.9</b> TG y DTG de la combustión de la Guadua Angustifolia a 2,5 °C/min.....	77
<b>Figura 4.10</b> Gases producto de la combustión de la Guadua Angustifolia Kunth (1-2).....	80
<b>Figura 4.11</b> Gases producto de la combustión de la Guadua Angustifolia Kunth (3-7).....	81
<b>Figura 5.1.</b> TIC obtenidas por Py-GC / MS de Guadua Angustifolia-Kunth .....	85
<b>Figura 6.1</b> Partes principales de un sistema básico de gasificación de biomasa. ....	98

<b>Figura 6.2</b> Modelo básico de gasificador en corriente descendente tapa abierta.....	104
<b>Figura 6.3</b> Modelo básico de gasificador en corriente ascendente. ....	107
<b>Figura 6.4</b> Gasificador en corriente descendente sin tapa para Guadua Angustifolia.....	110
<b>Figura 6.5</b> Productos gasificación corriente descendente sin Tapa para Guadua Angustifolia.....	111
<b>Figura 6.6</b> Prueba fallida, reactor con depósito grande para cenizas. Prototipo no funcional .....	113
<b>Figura 6.7</b> Gasificador en corriente ascendente para guadua angustifolia. ....	115
<b>Figura 6.8</b> Modelo de ciclón con codo a 45 grados .....	120
<b>Figura 6.9</b> Sistema de radiador para enfriamiento de gases. ....	120
<b>Figura 6.10</b> Modelo de filtro para gases producto de gasificación, fabricado con accesorios PVC .....	121
<b>Figura 6.11</b> Sistema de gasificación con elementos auxiliares.....	122
<b>Figura 7.1</b> Partes del reactor de gasificación para combustión directa.....	126
<b>Figura 7.2</b> Zona de Gasificación con sus Partes. ....	128
<b>Figura 7.3</b> Detalles de tamaños y densidad de la Guadua Angustifolia Kunth. ....	129
<b>Figura 7.4</b> Anillo de Cuchillos para Lateado de Guadua.....	130
<b>Figura 7.5</b> Modelo propuesto para seccionado de Guadua Angustifolia.....	130
<b>Figura 7.6</b> Final del proceso de gasificación de Guadua Angustifolia y sus cenizas. ....	132
<b>Figura 7.7</b> Secuencia ilustrativa del proceso térmico hasta la generación de ceniza. ....	133
<b>Figura 7.8</b> Secuencia del movimiento de la parrilla giratoria, removiendo las cenizas. ....	133
<b>Figura 7.9</b> Intercambiador de calor para calentamiento o evaporación de agua. ....	134
<b>Figura 7.10</b> Ubicación del intercambiador de calor y el reactor de gasificación de combustión directa.....	135
<b>Figura 8.1</b> Partes del reactor de gasificación de configuración múltiple.....	139
<b>Figura 9.1</b> Estufas cohete (Rocket Stove).....	146
<b>Figura 9.2</b> Construcción de la estufa cohete (Rocket Stove), modificada para evaporación de agua de mar. ....	147
<b>Figura 9.3</b> Pruebas de ebullición de agua de mar. ....	148
<b>Figura 9.4</b> Estufa cohete modificada para evaporación de agua de mar. ....	150
<b>Figura 9.5</b> Serpentina de enfriamiento y caudal de condensado.....	150
<b>Figura 9.6</b> Pruebas con cemento expansivo.....	154
<b>Figura 9.7</b> Pruebas de fabricación de paneles constructivos con malla de guadua y cemento expansivo. ....	154



## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 2.1</b> Análisis inmediato de varios tipos de biomasas lignocelulósicas (db).....	29
<b>Tabla 2.2</b> Análisis elemental de varios tipos de biomasas lignocelulósicas (% peso, db).....	30
<b>Tabla 2.3</b> Composición estructural de varios tipos de biomasa (% peso, db). ....	33
<b>Tabla 2.4</b> PCS de varios tipos de biomasas lignocelulósicas.....	36
<b>Tabla 2.5</b> Elementos mayoritarios de la Guadua Angustifolia Kunth. ....	39
<b>Tabla 2.6</b> Elementos minoritarios de la Guadua Angustifolia Kunth. ....	40
<b>Tabla 3.1</b> Temperaturas de descomposición de la lignina, la celulosa y la hemicelulosa mediante pirólisis. ....	49
<b>Tabla 3.2</b> Determinación de los parámetros cinéticos para diferentes grados de conversión. ....	55
<b>Tabla 3.3</b> Gases obtenidos a partir de la pirólisis de la Guadua Angustifolia Kunth. ....	59
<b>Tabla 4.1</b> Perfiles de combustión de diferentes combustibles sólidos.....	72
<b>Tabla 4.2</b> Parámetros cinéticos de la combustión de la Guadua Angustifolia por el método Coats–Redfern .....	77
<b>Tabla 4.3</b> Parámetros cinéticos de varios tipos de biomasas por el método Coats–Redfern.....	78
<b>Tabla 4.4</b> Gases producto de la combustión de la Guadua Angustifolia Kunth. ....	79
<b>Tabla 5.1</b> Gases Condensables de pirólisis rápida de la Guadua Angustifolia Kunth.....	84
<b>Tabla 6.1</b> Reacciones típicas de la gasificación de biomasa. Fuente: Modificada de Basu 2010 [51].....	95
<b>Tabla 6.2</b> Principales Agentes Gasificantes.....	97
<b>Tabla 6.3</b> Correlaciones para estimación de gases productos de gasificación de biomasa .....	116
<b>Tabla 6.4</b> Comparativa de la composición de gases de gasificación de la Guadua y diferentes biomasas .....	117
<b>Tabla 9.1</b> Resultados prueba de ebullición de agua de mar con Guadua Angustifolia como combustible .....	149
<b>Tabla 9.2</b> Resultados prueba de evaporación de agua de mar con guadua angustifolia como combustible. ....	152

## NOMENCLATURA

		<b>UNIDADES</b>
<b>ER</b>	Relación estequiométrica	<i>kg aire/kg combustible</i>
<b>PCS</b>	Poder calorífico superior	<i>MJ/kg, MJ/Nm<sup>3</sup>, MJ/l</i>
<b>PCI</b>	Poder calorífico inferior	<i>MJ/kg, MJ/Nm<sup>3</sup>, MJ/l</i>
<b>T</b>	Temperatura	<i>°C, K</i>
<b>h<sub>v</sub></b>	Calor latente de vaporización del agua	<i>kJ/kg</i>
<b>P</b>	Potencia	<i>W, kW</i>
<b>R</b>	Constante universal de los gases	<i>kJ/mol K</i>
<b>R<sup>2</sup></b>	Coefficiente de correlación	<i>Adimensional</i>
<b>E<sub>a</sub></b>	Energía de activación	<i>kJ/mol</i>
<b>A</b>	Factor pre-exponencial	<i>s<sup>-1</sup>, min<sup>-1</sup></i>
<b>n</b>	Orden de reacción	<i>Adimensional</i>
<b>α</b>	Grado de conversión	<i>%</i>
<b>β</b>	Velocidad de calentamiento	<i>°C/min</i>
<b>t</b>	Tiempo	<i>s, min</i>
<b>m</b>	Masa	<i>kg</i>
<b>d</b>	Densidad	<i>g/cm<sup>3</sup>.</i>
<b>G</b>	Porcentaje en peso del agua formada a partir de la combustión del hidrógeno junto con la humedad propia del combustible.	

### Unidades de medida

<b>g</b>	Gramos	<b>kg</b>	Kilogramo
<b>lb</b>	Libras	<b>mg/kg</b>	Miligramo por kilogramo
<b>kJ</b>	Kilojulio	<b>kJ/mol</b>	Kilojulio por mol
<b>MJ</b>	Megajulio	<b>kJ/mol K</b>	Kilojulio por mol y Kelvin

<b><i>W</i></b>	Vatio	<b><i>kWh</i></b>	Kilovatios hora
<b><i>kW</i></b>	Kilovatio	<b><i>kWhe/kg</i></b>	Kilovatios eléctricos hora por kilogramo
<b><i>cm</i></b>	Centímetro	<b><i>km</i></b>	Kilómetro
<b><i>m</i></b>	Metro	<b><i>ha</i></b>	Hectárea
<b><i>s</i></b>	Segundos	<b><i>mol</i></b>	Mol
<b><i>min</i></b>	Minutos	<b><i>l</i></b>	Litros

### Subíndices y Superíndices

<b><math>m_i</math></b>	Masa inicial
<b><math>m_f</math></b>	Masa final
<b><math>m_t</math></b>	Masa en el instante t
<b><math>T_{(K)}</math></b>	Temperatura absoluta expresada en Kelvin
<b><math>n_\alpha</math></b>	Variables evaluadas para el grado de conversión $\alpha$

### Siglas

<b>TG</b>	Curva termogravimétrica
<b>DTG</b>	Curva de termogravimetría derivada
<b>SDTA</b>	Análisis térmico diferencial
<b>ICP-OES</b>	Espectrometría de emisión óptica de plasma acoplada inductivamente
<b>ICP-MS</b>	Espectrometría de masas por plasma acoplado inductivamente
<b>FAAS</b>	Espectrometría de absorción atómica por llama

**FES** Fotometría de llama

**Hol** Holocelulosa

**Py-GC / MS** Cromatografía de gases de pirólisis cuantitativa -  
espectrometría de masas

### Elementos y Compuestos Químicos

<b>C</b>	Carbono	<b>H<sub>2</sub>O</b>	Agua
<b>H</b>	Hidrogeno	<b>CO<sub>2</sub></b>	Dióxido de carbono
<b>O</b>	Oxigeno	<b>CO</b>	Monóxido de carbono
<b>N</b>	Nitrógeno	<b>CH<sub>4</sub></b>	Metano
<b>S</b>	Azufre	<b>C<sub>2</sub>H<sub>2</sub></b>	Acetileno
<b>Cl</b>	Cloro	<b>C<sub>2</sub>H<sub>4</sub></b>	Etileno
<b>Al</b>	Aluminio	<b>C<sub>2</sub>H<sub>6</sub></b>	Etano
<b>Ba</b>	Bario	<b>C<sub>6</sub>H<sub>6</sub></b>	Benceno
<b>Ca</b>	Calcio		
<b>Fe</b>	Hierro	<b>Cd</b>	Cadmio
<b>Mg</b>	Magnesio	<b>Cu</b>	Cobre
<b>K</b>	Potasio	<b>Cr</b>	Cromo
<b>Si</b>	Silicio	<b>Ni</b>	Níquel
<b>Na</b>	Sodio	<b>Pb</b>	Plomo
<b>Ti</b>	Titanio	<b>Co</b>	Cobalto
<b>P</b>	Fósforo	<b>Mo</b>	Molibdeno
<b>As</b>	Arsénico	<b>Sb</b>	Antimonio
<b>Mn</b>	Manganeso	<b>V</b>	Vanadio
<b>Hg</b>	Mercurio	<b>Zn</b>	Zinc

**CAPÍTULO 1**  
**INTRODUCCIÓN**



### Generalidades de la Guadua Angustifolia Kunth en Colombia.

La Guadua Angustifolia Kunth es un tipo de bambú gigante perteneciente a la familia de las gramíneas, es una planta de rápido crecimiento, una vez que brota puede llegar a obtener una altura aproximada de hasta 30 metros y con diámetros hasta 25 cm en menos de 5 años, este bambú tiene excelentes propiedades físico mecánicas y es ampliamente utilizado en Suramérica en la industria de la construcción, muebles y en artesanías. [1]–[3]. **(Figura 1.1 y Figura 1.2).**

También se han desarrollado investigaciones para su uso en la fabricación de carbón activado y como producto comestible utilizando sus brotes.[4], [5]. La gran mayoría de literatura sobre Guadua Angustifolia Kunth está consignada en investigaciones hechas por instituciones educativas colombianas, adicionalmente se han elaborado normas de calidad para cultivo y uso en general.[1] Según lo afirma el ministerio de agricultura y desarrollo rural de Colombia, este país es el segundo en diversidad de bambú en Latinoamérica y cuenta con 24 especies de bambú endémico siendo la Guadua Angustifolia Kunth una de ellas.[6]



*Figura 1.1. Guadua Angustifolia utilizada en construcción. Fuente: Izquierda Autor, derecha tomada de D'Guadua 2014 <https://josephromero10.wixsite.com/deguadua/gallery>.*



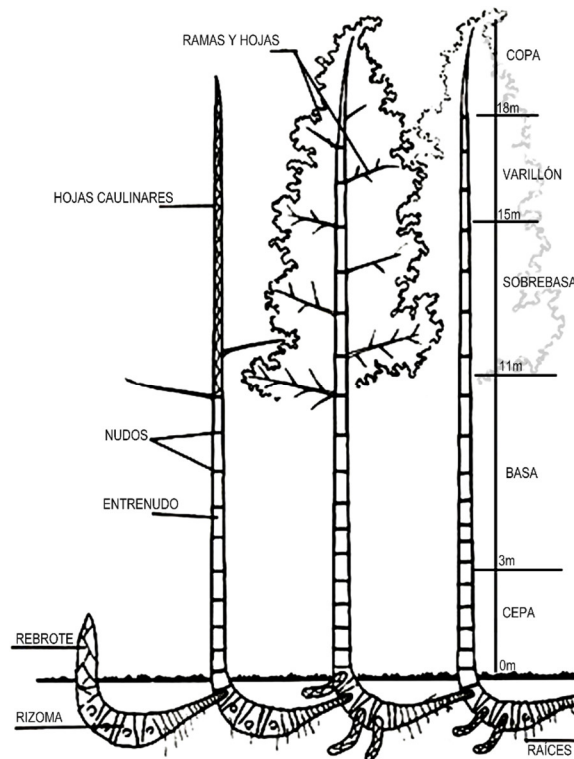
*Figura 1.2. Guadua Angustifolia utilizada en Muebles y Artesanías. Fuente: Tomada de D'Guadua 2014  
<https://josephromero10.wixsite.com/deguadua/gallery>*

Otra particularidad de este tipo de bambú según lo describen varios investigadores [7]–[9], es su capacidad de almacenar agua en su estructura, llegando a retener hasta 30000 litros por hectárea, esto en temporada de invierno y luego en temporada seca lo entrega al suelo de forma paulatina, investigaciones hechas en el centro nacional para el estudio del bambú-Guadua Colombia.

La Guadua Angustifolia es la especie de bambú más utilizada en Colombia por sus destacadas características y por su disponibilidad en la mayor parte del territorio de este país [1], [10]. En Colombia, existe una área aproximada de 51500 ha de Guadua Angustifolia de las cuales casi el 90% es silvestre y solo el restante ha sido cultivada [11]. Actualmente y debido al gran interés que ha despertado este bambú a nivel internacional, en Colombia se proyecta intensificar la producción para exportación, los medios difunden información referente a la iniciativa China para que en Colombia se siembre un promedio de 100.000 hectáreas anuales durante 20 años hasta llegar a 2 millones de hectáreas [12]. Según el estudio de Camargo y Amezquita [13], en la zona colombiana de Risaralda el rendimiento en tallos secos de Guadua Angustifolia por hectárea año, sería de aproximadamente 11,2 toneladas, biomasa con un poder calorífico superior de 17550

kJ/kg, según análisis propios realizados al bambú *Guadua Angustifolia* Kunth, estos datos permiten hacer una estimación de 196560 MJ por hectárea de *Guadua*, ahora si esta biomasa fuera utilizada para generación de electricidad por medio de un sistema de gasificación se podría obtener un aproximado de 11200 kWh (eléctricos) por hectárea año, manejando una rendimiento de conversión del gasificador de 1 kWh/kg [14], [15], estimando para una familia rural colombiana un consumo eléctrico mensual de 150 kWh, podemos calcular que su necesidad energética de tipo eléctrico se puede satisfacer con 5 kilogramos diarios de *Guadua Angustifolia* procesada por un sistema de gasificador-generador eléctrico.

### Partes de la Guadua Angustifolia Kunth



*Figura 1.3. Partes de la Guadua Angustifolia. Fuente: adaptado de [16]*

Son 4 las partes principales de un bambú *Guadua Angustifolia*; el rizoma, el tallo o culmo, las ramas y las hojas, en la **Figura 1.3**, se detallan las partes con sus subdivisiones.



El rizoma en la Guadua está encargado en dar soporte a la planta, tiene una parte superficial y otra bajo tierra donde se hallan las raíces, estas se ramifican y generan rebrotes que darán vida a nuevas guaduas. Muy poca literatura clarifica el tiempo total que una Guadua Angustifolia demora desde su siembra hasta dar tallos de diámetros mayores de 15 centímetros, en consulta a cultivadores y comerciantes de Guadua en Colombia [17], manifiestan que al sembrar Guadua la planta se adapta en los 3 primeros años y de 6 a 8 años se tendrán plantas maduras pero de diámetros inferiores y luego de este aprovechamiento a partir el año 12 la planta tendrá los diámetros y alturas que la literatura reporta (diámetros superiores a 15 cm).

Del rizoma sale el tallo de la Guadua o culmo, este tiene forma cilíndrica, es hueco en su interior con segmentos formados por entrenudos y unidos entre sí por nudos, distanciados entre sí de 10 cm y 25 cm según su altura en el tallo. Los culmos pueden alcanzar promedios de 18 m a 20 m y diámetros entre 5 cm y 25 cm [18] citado por [19].

El tallo se divide en 4 partes aprovechables en la construcción y diferenciadas normalmente por sus diámetros: cepa, basa, sobre basa, varillón [20] y la copa que normalmente se convertirá en materia orgánica y alimentará el Guadual.

Después de brotar los tallos llegan a su máxima altura antes de los 5 años y del tercer al sexto año adquieren su máxima resistencia y dureza, tiempo en cual se recomienda para su utilización en la construcción.

Antes de la salida de las ramas el culmo o tallo es cubierto por unas hojas caulinares que se encargan de proteger la planta a esta temprana edad, desarrollado el culmo, las ramas salen de unas yemas por encima de los nudos y con estas su hojas foliares, que tienen forma angosta y alargada con longitudes entre 15 y 20 cm y anchos entre 2 y 5 cm [2], [6].

### **Carencias energéticas en comunidades colombianas.**

En Colombia casi 2,5 millones de personas no cuentan con el servicio de energía eléctrica y un indicativo de expansión de cobertura de energía eléctrica, realizado por la Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME) del Ministerio de Minas y Energía de Colombia, considera que se requieren un poco más de \$ 1.300 millones de dólares para lograr llevar la energía eléctrica al 100% de los colombianos [21].

En cuanto suministro energético para preparación de alimentos en Colombia, aproximadamente el 9% de las familias utilizan madera y carbón [22],[23] normalmente con estufas de combustión tradicionales en las que el aprovechamiento energético del combustible es muy bajo, llegando a necesitar un promedio de 20 kilogramos de leña diario por familia de 4 integrantes, o lo que es lo mismo 5 kilogramos de leña diario por persona [24]

Esta Tesis muestra una ruta viable para mitigar las dos situaciones problema mencionadas anteriormente, como es la utilización de la Guadua Angustifolia Kunth con pequeños reactores de gasificación para la generación de calor o electricidad en las diferentes zonas carentes de suministro eléctrico y donde la cocción de alimentos o generación de calor se está haciendo con métodos tradicionales de combustión de leña.

### **MOTIVACIÓN DE LA TESIS**

La gran disponibilidad del bambú Guadua Angustifolia Kunth en Colombia y sus excelentes características como recurso renovable motiva la investigación de procesos que ofrezcan una solución integral para el manejo y utilización de esta materia prima.

En Colombia comunidades de bajos recursos carecen de viviendas dignas y de suministro de energía eléctrica y gas, obviando, por desconocimiento, que poseen una excelente materia prima

que utilizada de técnicamente podría satisfacer de manera económica sus necesidades energéticas y de vivienda.

Razón por la cual es fundamental caracterizar el bambú Guadua Angustifolia Kunth y desarrollar procesos técnicos para su aprovechamiento energético y constructivo, que viabilicen su utilización en comunidades rurales y de bajos recursos en Colombia

### **OBJETIVOS DE LA TESIS**

El objetivo principal de esta Tesis Doctoral es evaluar las posibilidades que ofrece la Guadua Angustifolia Kunth como recurso energético mediante procesos termoquímicos y, especialmente, mediante su gasificación. Específicamente, para facilitar la valorización energética de la Guadua mediante su gasificación, se persigue el desarrollo de un reactor de gasificación de bajo coste que constituya una alternativa viable para el suministro energético en comunidades rurales de Colombia.

Para la consecución del objetivo propuesto, se plantean los siguientes objetivos específicos:

Efectuar la caracterización del bambú Guadua Angustifolia Kunth, mediante su análisis inmediato y elemental, su poder calorífico, su análisis de elementos mayoritarios y minoritarios y el análisis de su composición estructural.

Estudiar, mediante análisis termogravimétrico, el comportamiento de la Guadua Angustifolia Kunth en los procesos de transformación termoquímica pirólisis y combustión, analizando la cinética de los procesos y la evolución de los principales compuestos que se emiten durante los mismos.

Desarrollar un modelo de reactor de gasificación de bajo coste para el uso del bambú Guadua Angustifolia Kunth, como materia prima para la obtención de energía.

Definir nuevas líneas de investigación que permitan implementar tecnologías de aprovechamiento energético de la Guadua Angustifolia Kunth como solución a las necesidades energéticas de comunidades rurales en Colombia.

### **ESTRUCTURA DE LA TESIS**

La Tesis se estructura en 9 capítulos. El primer capítulo muestra las generalidades de la Guadua Angustifolia Kunth, una breve descripción de las carencias energéticas en Colombia, la motivación y objetivos de la tesis.

El Capítulo 2 detalla los resultados de los análisis inmediato, elemental, poder calorífico, elementos mayoritarios y minoritarios y la composición estructural de la biomasa, comparándolos con otros tipos de biomasa lignocelulósicas.

El Capítulo 3 muestra el análisis termogravimétrico de la pirólisis de la Guadua Angustifolia Kunth, las temperaturas de descomposición por pirólisis, su energía de activación y los gases productos obtenidos de su pirólisis.

En el Capítulo 4 se muestra el análisis termogravimétrico de la combustión de la Guadua Angustifolia Kunth, las temperaturas de combustión, su energía de activación y los gases productos de su combustión.

En el Capítulo 5 se documenta la composición del combustible líquido obtenido por pirólisis rápida de la Guadua Angustifolia Kunth.

En el Capítulo 6 se muestra una revisión documental del proceso de gasificación de biomasa lignocelulósicas, enfatizando el estudio en gasificadores del lecho fijo, corriente ascendente y

corriente descendente, por último se muestra el proceso de gasificación de la Guadua Angustifolia, en corriente ascendente y descendente y la estimación de los gases de gasificación y su poder calorífico.

El Capítulo 7 muestra el diseño de un reactor de gasificación corriente ascendente para combustión directa, a ser utilizado en el calentamiento de agua con Guadua Angustifolia Kunth como combustible.

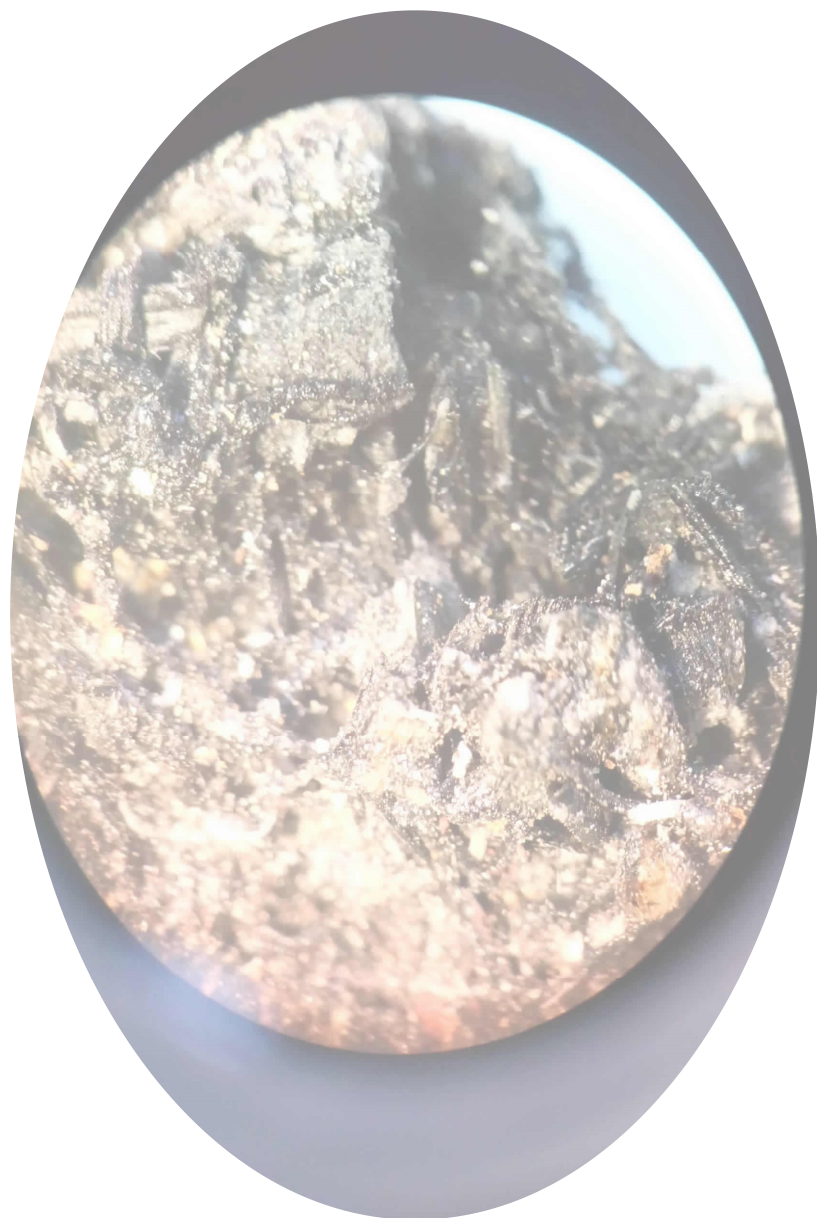
En el Capítulo 8 se expone la formulación de la patente de modelo de utilidad recibida por el Autor, para un modelo de reactor de gasificación de biomasa - Guadua Angustifolia Kunth, que permite gasificar en corriente ascendente, descendente o corriente cruzada.

En el Capítulo 9 se documentan pruebas experimentales utilizando Guadua Angustifolia como combustible para evaporación de agua de mar y se proponen futuras investigaciones con la Guadua Angustifolia Kunth.

Por último, se exponen las conclusiones y los anexos del trabajo.

## CAPÍTULO 2

### CARACTERIZACIÓN DE LA GUADUA ANGUSTIFOLIA KUNTH



### Análisis Inmediato

El análisis inmediato es el conjunto de ensayos de laboratorio mediante los cuales se determinan los porcentajes de humedad, cenizas, materia volátil y carbono fijo de una muestra [25]. La determinación de la humedad se realizó según la norma UNE-EN ISO 18134-3:2016, para biocombustibles sólidos, por el método de secado en estufa. Por otra parte, la determinación del rendimiento en materia volátil, se llevó a cabo según la norma UNE-EN 18123. La determinación del rendimiento en cenizas se efectuó de acuerdo con la norma UNE-EN ISO 18122 para biocombustibles sólidos. Finalmente, el carbono fijo se calculó por diferencia, según la norma ASTM D3172, de la siguiente forma:

$$\% \text{Carbono fijo} = 100 - (\% \text{Humedad} + \% \text{Volátiles} + \% \text{Cenizas}). \quad [26] \quad (1)$$

En la Ecuación (1), todos los valores están expresados en base “seca al aire” (ad).

El análisis inmediato de la Guadua Angustifolia Kunth arrojó los siguientes resultados:

HUMEDAD	=	7,8%	en peso (ad)
MATERIA VOLÁTIL	=	75,8%	en peso (db)
CENIZAS	=	3,8%	en peso (db)
CARBONO FIJO	=	20,4%	en peso (db) (calculado por diferencia)

Como puede observarse en los resultados anteriores, la base de referencia para la humedad es “seca al aire” (ad), y “base seca” (db) para la materia volátil, cenizas y carbono fijo.

En la **Tabla 2.1** se muestra la comparación del análisis inmediato de la Guadua Angustifolia Kunth con otras biomásas lignocelulósicas (en base seca):

*Tabla 2.1 Análisis inmediato de varios tipos de biomásas lignocelulósicas (db)*

<b>BIOMASA</b>	<b>MATERIA VOLÁTIL</b>	<b>CENIZAS</b>	<b>CARBONO FIJO</b> (Por diferencia)	<b>REFERENCIA</b>
Guadua Angustifolia	75,8	3,80	20,40	
Madera de café	85,07	2,03	12,90	[27]
Madera de chopo	73,00	2,80	24,20	[28]
Madera de olivo	79,60	3,20	17,20	[29]
Mazorca de maíz	87,40	1,10	11,50	[30],[31]
Madera de Caucho	80,10	0,70	19,20	[32]
Bambú Tulda	80,30	4,50	15,20	[33]
Bambú Vulgaris Vitata	76,70	5,14	18,10	[34], [35]

Analizando la **Tabla 2.1**, la Guadua Angustifolia tiene un rendimiento menor en materia volátil, pero mayor rendimiento en carbono fijo, exceptuando la madera de chopo que muestra el mayor contenido de carbono fijo. Se infiere que la Guadua Angustifolia Kunth tendrá un buen rendimiento para la obtención de carbón activado como una de sus posibles aplicaciones [36]–[38]. Se observa que, tanto la Guadua Angustifolia Kunth como los otros dos tipos de bambúes, presentan un porcentaje bajo de cenizas pero superior a las demás biomásas recogidas en la **Tabla 2.1**.

### **Análisis Elemental**

El análisis elemental es la técnica de análisis químico que permite determinar la cantidad de carbono, hidrógeno, nitrógeno y azufre, en muestras sólidas o líquidas. Para el caso de la Guadua Angustifolia se aplicó la técnica por combustión, en la cual se pesa la muestra y se encapsula en estaño para luego ser llevada a su completa combustión de forma instantánea a 1150 °C dentro del equipo (macro Elemental vario). En este proceso, se utiliza oxígeno como comburente y helio como gas portador. Mediante su combustión, la muestra se convierte en una fase gaseosa (N<sub>2</sub>, N<sub>x</sub>O<sub>y</sub>, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, SO<sub>2</sub>, SO<sub>3</sub>). Estos gases pasan por un tubo de reducción para la determinación



selectiva de N<sub>2</sub> , CO<sub>2</sub> , H<sub>2</sub> O y SO<sub>2</sub>, luego son separados en columnas específicas y resorbidos térmicamente, para ser analizados de forma independiente por medio de un detector de conductividad térmica. El porcentaje de cada elemento se calcula por medio de una curva de calibración, teniendo en cuenta el peso inicial de la muestra [39],[40]. A continuación, se muestra el resultado del análisis elemental, expresado en base seca, para la Guadua Angustifolia Kunth:

C = 47,92% en peso (db)  
 H = 6,68 % en peso (db)  
 N = 0,45% en peso (db)  
 S = 0,66% en peso (db)  
 O = 40,49% en peso (db) (calculado por diferencia)

La **Tabla 2.2** muestra la comparación del análisis elemental de la Guadua Angustifolia Kunth con otras biomásas lignocelulósicas (en % en peso, en base seca).

*Tabla 2.2 Análisis elemental de varios tipos de biomásas lignocelulósicas (% peso, db).*

<b>BIOMASA</b>	<b>C</b>	<b>H</b>	<b>N</b>	<b>S</b>	<b>O</b> (Por diferencia)	<b>REFERENCIA</b>
Guadua Angustifolia	47,92	6,68	0,45	0,66	40,49	[41]
Madera de café	43,00	4,70	0,90	0,07	36,30	[27]
Madera de chopo	46,09	5,56	0,33	0,24	47,76	[28]
Madera de olivo	48,20	5,30	0,70	0,03	44,20	[29]
Mazorca de maíz	49,00	5,40	0,50	0,2	44,5	[30],[31]
Madera de caucho	50,60	6,50	0,20	*NR	42,00	[32]
Bambú Tulda	48,39	5,86	2,04	*NR	39,21	[33]
Bambú Vulgaris Vitata	45,90	5,81	*NR	*NR	43,10	[34], [35]

\*NR: No reportado.

Según Demirbas [30], los porcentajes comunes de carbono en las biomásas están entre 42 % y 54 % en peso en base seca. Como se observa en la **Tabla 2.2**, la Guadua Angustifolia muestra un contenido de carbono muy similar a maderas como la del chopo y el olivo, a la mazorca de maíz y con valores similares al bambú Tulda y Vitata. Por otra parte, presenta un contenido de azufre relativamente bajo y cercano a los valores de las otras biomásas mostradas en la **Tabla 2.2**, pero

ligeramente superior. El contenido de hidrogeno también es similar al que presentan otros tipos de biomasa (**Tabla 2.2**). En términos generales, la Guadua Angustifolia Kunth posee una composición elemental similar a la mayoría de biomásas lignocelulósicas.

### **Composición estructural de la biomasa**

Mediante la determinación de la composición estructural de la biomasa se determinan los porcentajes de lignina, celulosa y holocelulosa de una muestra (compuestos estructurales). Por diferencia entre la holocelulosa y la celulosa se calcula la hemicelulosa. La biomasa contiene cantidades variables de celulosa, lignina, hemicelulosa y extraíbles en pequeña cantidades, pero que pueden influir en las propiedades de la biomasa, tales como color, olor, durabilidad, adhesión, etc. Los extraíbles pueden ser compuestos orgánicos e inorgánicos. Entre los compuestos orgánicos figuran hidrocarburos alifáticos y aromáticos, alcoholes, fenoles, aldehídos, cetonas, ácidos alifáticos, ceras, glicéridos y compuestos nitrogenados. Las proporciones relativas de celulosa y lignina son uno de los factores determinantes para caracterizar las especies de plantas para su posterior utilización como cultivos energéticos [42] o como materia prima para producción de materiales como el papel o el textil.

La biomasa lignocelulósica es una fuente de energía renovable de que dispone nuestro planeta, utilizada en la industria química, energética, y en la construcción entre otros. Esta energía proviene directamente del sol, ya que las plantas que reciben energía solar, por medio de la fotosíntesis, transforman dióxido de carbono y agua en estructuras de carbono, convirtiéndose este en un proceso de almacenamiento masivo de energía solar. Esta energía puede ser transformada posteriormente en calor, electricidad o combustible de origen vegetal [43], [44]

### Composición estructural de la Guadua Angustifolia Kunth

La preparación de las muestras y la determinación de lignina, celulosa y hemicelulosa se llevaron a cabo siguiendo las normas TAPPI T222 om-15 para cada uno de estos componentes. Los reactivos usados fueron de alta pureza (grado analítico) y los análisis se efectuaron por triplicado.

Las muestras iniciales se secaron para realizar extracción Soxhlet en agua y en etanol/tolueno durante 24 horas, respectivamente, con el fin de dejar la fibra libre de extractos acuosos y orgánicos. Posteriormente, la fibra se llevó a sequedad en un horno Binder a  $105 \pm 1^\circ\text{C}$ , durante 12 horas y se volvió a pesar. Este procedimiento se realizó hasta que la diferencia de peso no fue superior al 1%. Posteriormente, se tomó este filtrado para realizar la determinación de lignina con una hidrólisis primaria con ácido sulfúrico durante 4 horas y una segunda hidrólisis en autoclave durante 2 horas a  $120^\circ\text{C}$  y, finalmente, se efectuó una filtración para después secarlo durante 2 días a  $65^\circ\text{C}$ . Para la cuantificación de la holocelulosa, la muestra resultante de la deslignificación se atacó con ácido acético glacial y clorato de sodio durante 6 horas. Se decantó el licor y se lavó con agua destilada hasta precipitado neutro. Se depositó en horno y se dejó secar durante 2 días a  $65^\circ\text{C}$ , luego se pesó el producto resultante. Este último análisis se realiza para poder hallar la hemicelulosa por diferencia entre la celulosa y la holocelulosa.

A continuación se muestran los resultados de la composición estructural de la Guadua Angustifolia Kunth (en base seca):

LIGNINA KLASON	= 24,6%	en peso
CELULOSA	= 46,9 %	en peso
HEMICELULOSA	= 17,6%	en peso
HOLOCELULOSA	= 64,5%	en peso
EXTRAÍBLES + CENIZAS	= 10,9%	en peso

La **Tabla 2.3** muestra la comparación de la composición estructural del bambú Guadua Angustifolia con otras biomásas lignocelulósicas.

*Tabla 2.3 Composición estructural de varios tipos de biomasa (% peso, db).*

BIOMASA	LIGNINA	CELULOSA	HEMICELULOSA	REFERENCIA
Guadua Angustifolia	24,6	46,9	17,6	
Madera de café	17,80	33,5	24,97	[45]
Madera de chopo	19,6	54,5	22,0	[46]
Madera de olivo	20,8	36,6	19,7	[47]
Mazorca de maíz	15,0	50,50	31,0	[30],[31]
Madera de haya	21,9	45,30	31,20	[30],[31]
Bambú Vulgaris Vitata	26,9	45,40	21,10	[34], [35]

La composición estructural de la Guadua Angustifolia es muy similar a la obtenida por Salas-Enriquez y col. que es 47,12% de celulosa, 18,21% de hemicelulosa y 22,76% de lignina. Como puede observarse, respecto a los valores publicados por Salas-Enriquez y col. [48], las mayores diferencias corresponden al contenido en lignina, que es ligeramente superior en las muestras analizadas en este trabajo. El contenido de lignina del bambú Guadua Angustifolia Kunth y el bambú Vulgaris Vitata son superiores a las demás biomásas mostradas en la **Tabla 2.3**. La Guadua Angustifolia Kunth también cuenta con un importante valor del contenido en celulosa, casi el 50% de su peso seco.

La lignina posee aproximadamente un 70% de contenido de carbono y un poder calorífico superior aproximado de 26670 kJ/kg, la celulosa y hemicelulosa, con un 45% y 40% de carbono respectivamente, tienen un poder calorífico de 17166 kJ/kg [49]. Puesto que el porcentaje de lignina en la Guadua es del 24,6%, esta contribuye aproximadamente en un 37% al poder calorífico superior de la Guadua.

### **Poder Calorífico**

Se llama poder calorífico a la energía que libera un combustible al quemarse de forma completa. El poder calorífico se expresa en unidades de energía por unidad masa o volumen, de esta forma para combustibles sólidos se expresa en MJ/kg, para combustibles líquidos en MJ/l y en MJ/Nm<sup>3</sup> para gases [42].

Existen dos formas de expresar el poder calorífico de un combustible, Poder Calorífico Superior (PCS) y Poder Calorífico Inferior (PCI).

El poder calorífico superior (PCS) es el calor liberado por la combustión total de un kilogramo de combustible a 25 °C, cuando los gases y productos de la combustión son llevados también a 25 °C después de la combustión. Por lo tanto, todo el vapor de agua estará condensado. Este vapor de agua procede del contenido de humedad del combustible y del agua liberada por la combustión del hidrógeno del propio combustible [50],[51].

El poder calorífico inferior (PCI) es el calor liberado en la combustión completa de 1 kg de combustible en condiciones en las que el agua producto de la combustión se encuentra en estado vapor y, por lo tanto, no se recupera su calor latente de condensación [52].

#### **Determinación del poder calorífico superior de la Guadua Angustifolia Kunth**

Para la determinación del PCS, se utilizó una balanza analítica Mettler Toledo modelo AB 204SNR 111660708 (Suiza) y un Calorímetro IKA C 2000 Basic S1 operando en modo Isoperibólico. Se usó oxígeno industrial extraseco grado 2.7, a una presión de 30 bar. La temperatura de la chaqueta del calorímetro fue controlada a 25°C con un baño termostático Julabo F12, No. Serie 10126900. El contenido de azufre se determinó empleando un espectrofotómetro

Spectronic Genesys 5, No. Serie 3V87307003, No. Cat. 336008. Milton Roy Company. El contenido de azufre se determinó para realizar las correcciones exigidas por la norma ASTM D240 y está dentro de los límites establecidos por la norma ASTM D 516 (5-40 ppm). El valor final del contenido de azufre corresponde al promedio de 3 muestras y se determinó usando la linealidad del método espectrofotométrico. El método determina sulfatos, pero su contenido se expresa como azufre elemental, empleando para la conversión los correspondientes pesos moleculares.

Como se comentó anteriormente, se realizaron 3 determinaciones del PCS del bambú de la Guadua Angustifolia Kunth. Se promediaron los resultados y se dejó el valor aproximado al múltiplo más cercano a cinco. A continuación, se muestran los tres valores obtenidos, así como el promedio.

ENSAYO 1 = 17491 kJ/kg

ENSAYO 2 = 17500 kJ/kg

ENSAYO 3 = 17665 kJ/kg

**PCS PROMEDIO = 17550 kJ/kg (ad)**

### **Cálculo del poder calorífico inferior de la Guadua Angustifolia**

En general, el valor de poder calorífico inferior es mejor referente para estimar los parámetros de diseño de un proceso de combustión industrial [53]. Para determinar el poder calorífico inferior, al PCS se le debe restar el calor liberado en la condensación del agua procedente tanto de la humedad del combustible como de la combustión del hidrógeno.

El valor del calor latente de vaporización del agua ( $h_v$ ) empleado es 2500 kJ / kg [54].

$$PCI = PCS - h_v * G \quad (2)$$

En la Ecuación (2), PCI es el Poder Calorífico Inferior en kJ/kg, PCS es el Poder Calorífico Superior en kJ/kg y G es el peso de agua formada a partir de la combustión del hidrogeno más la humedad propia del combustible (kg agua/ kg combustible).

Por lo tanto, G se calcula mediante la expresión  $G = 9 \cdot (\%H)/100 + (\%H_2O)/100$ , siendo 9 los kilogramos de agua que se forman al oxidar completamente un kilogramo de hidrógeno. Además, en la citada expresión, (%H) y (%H<sub>2</sub>O) representan los porcentajes de hidrógeno y humedad contenidos en la Guadua, respectivamente. De esta forma, el PCI puede calcularse a partir del PCS mediante la expresión  $PCI = PCS - 2500 (9\%H + \%H_2O)/100$  (en kJ/ kg) [50]. Dado que el poder calorífico superior determinado para el tallo de Guadua Angustifolia Kunth es 17550 kJ/kg (ad), para el cálculo del PCI, utilizando los datos del porcentaje de hidrogeno y humedad tomados de los análisis elemental e inmediato de la Guadua en la ecuación anterior, se obtiene el PCI de Guadua Angustifolia Kunth.

$$PCI = 17550 - 2500 (9 \cdot 0,0616 + 0,078)$$

$$PCI = 15969 \text{ kJ/ kg (ad)}$$

La **Tabla 2.4** muestra la comparación del PCS de la Guadua Angustifolia Kunth con otras biomásas lignocelulósicas.

*Tabla 2.4 PCS de varios tipos de biomásas lignocelulósicas.*

BIOMASA	PCS (kJ/kg)	REFERENCIA
Guadua Angustifolia	17550	
Bambú Moso	17570	[55]
Madera de café	17521	[27]
Madera de chopo	18422	[56]
Madera de olivo	19100	[29]

Como se observa en la **Tabla 2.4**, la Guadua Angustifolia Kunth tiene aproximadamente un 10% menos PCS que la madera de olivo y, aproximadamente, un 5% menos PCS que la madera de chopo. Sin embargo, si se compara con la madera de café y el bambú Moso, el PCS es prácticamente igual. En términos generales, el poder calorífico de la Guadua Angustifolia Kunth es muy cercano a la mayoría de las biomásas lignocelulósicas.

Una forma de poder predecir el valor del PCS de este tipo de biomasa es a partir de su análisis químico. Así, a partir de los porcentajes de lignina, celulosa y holocelulosa, se pueden utilizar las ecuaciones propuestas por Álvarez Rodríguez y col. [57].

$$\text{PCS} = (16,5917 + (0,0191 * \text{Hol})) \quad [57] \quad (3)$$

En la expresión anterior (3), las unidades del PCS son kJ/g y Hol representa el % en peso en base seca de holocelulosa.

Para este cálculo del PCI, se emplean los datos del porcentaje de holocelulosa de la **Tabla 2.3**, que es la suma de los porcentajes de hemicelulosa y celulosa, obteniéndose el siguiente resultado:

$$\text{PCS} = (16,5917 + (0,0191 * 64,5))$$

$$\text{PCS} = 17824 \text{ kJ/kg}$$

Este valor presenta solo un 1,6% de diferencia con el valor obtenido en el ensayo de determinación de PCS con calorímetro, que fue 17550 kJ/ kg. Esto pone de manifiesto que tanto los resultados de la ecuación que proporciona el PCI a partir de la composición estructural como los que se obtienen experimentalmente guardan una gran concordancia, ratificando el acierto de la predicción del PCS con la correlación que utiliza el porcentaje de holocelulosa [57].



### **Determinación de elementos mayoritarios de la Guadua Angustifolia Kunth**

La determinación de elementos mayoritarios de la Guadua Angustifolia Kunth se realizó según la norma UNE-EN ISO 16967:2015 sobre determinación de los elementos principales de los biocombustibles sólidos y de sus cenizas, que son Al, Ca, Fe, Mg, P, K, Si, Na y Ti.

Los elementos descritos anteriormente como elementos principales de los biocombustibles sólidos son de hecho elementos principales de las cenizas del combustible más que de los combustibles. La determinación de estos elementos se puede utilizar para evaluar el comportamiento de las cenizas en un proceso de conversión térmica o para evaluar la utilización de las cenizas, fundamentalmente como fertilizante o abono. Por otra parte, se pueden utilizar como indicador de contaminación del biocombustible, ya que valores altos de varios elementos puede indicar la contaminación de este por arena y tierra [58], [59].

La detección de los elementos se puede realizar mediante:

ICP-OES: Espectrometría de emisión óptica de plasma acoplada inductivamente

ICP-MS: Espectrometría de masas por plasma acoplado inductivamente

FAAS: Espectrometría de absorción atómica por llama

FES: Fotometría de llama

Es importante determinar la presencia y concentración de estos elementos, porque pueden provocar reacciones químicas que perjudiquen o beneficien un proceso al ser utilizadas como aditivos, o en el momento que se formen por combustión de la materia prima pueden causar corrosión de los dispositivos y elementos con los que interactúen.

*Tabla 2.5 Elementos mayoritarios de la Guadua Angustifolia Kunth.*

Elementos “MAYORITARIOS” de la Guadua Angustifolia UNE-EN ISO 16967:2015			
BIOMASA	ELEMENTO	UNIDADES	RESULTADO
GUADUA ANGUSTIFOLIA KUNTH	Aluminio	mg/kg	18,10
	Bario	mg/kg	5,260
	Calcio	mg/kg	25,10
	Hierro	mg/kg	16,40
	Magnesio	mg/kg	46,20
	<b>Potasio</b>	<b>mg/kg</b>	<b>5229</b>
	Silicio	mg/kg	234,0
	Sodio	mg/kg	584,0
	Titanio	mg/kg	<1,00
Fósforo	mg/kg	164,0	

Como puede observarse en la **Tabla 2.5**, el elemento con mayor presencia en la Guadua Angustifolia Kunth es el potasio (K), con una concentración de 5229 miligramos por cada kilogramo, seguido por el sodio (Na) con 584 miligramos por cada kilogramo y el silicio (Si) con 234 miligramos por cada kilogramo. Fryda y col. [60] también reportaron valores altos de K y Si en la Guadua, con concentraciones de 9902 y 12731 mg/kg, respectivamente, en sus cenizas. De hecho, la concentración de K en la Guadua es mucho más alta que en la madera y el carbón [60]. Debe tenerse en cuenta que las altas concentraciones de K y Si en este tipo de biomasa puede originar problemas de ensuciamiento (“fouling”) y de formación de escorias (“slagging”), si esta se empleara directamente como combustible en una caldera.

### **Determinación de los elementos minoritarios de la Guadua Angustifolia Kunth**

La determinación de elementos minoritarios de la Guadua Angustifolia Kunth se realizó según la norma (UNE-EN ISO 16968:2015). Se consideran elementos minoritarios de los biocombustibles sólidos los siguientes: As, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Mn, Mo, Ni, Pb, Sb, V, Zn. El procedimiento para la determinación de elementos minoritarios se realiza de la misma forma

que para los mayoritarios, variando las concentraciones de reactivos y temperaturas. Análogamente, para la cuantificación, se utilizan las mismas técnicas de espectrometría relacionadas anteriormente [59], [61].

En el caso de utilizar las cenizas como fertilizante es fundamental asegurarse de la ausencia de ciertos elementos tóxicos, el ensayo sobre los elementos minoritarios nos permite su determinación.

La **Tabla 2. 6** muestra los resultados de la determinación de los elementos minoritarios presentes en la Guadua Angustifolia Kunth.

*Tabla 2. 6. Elementos minoritarios de la Guadua Angustifolia Kunth.*

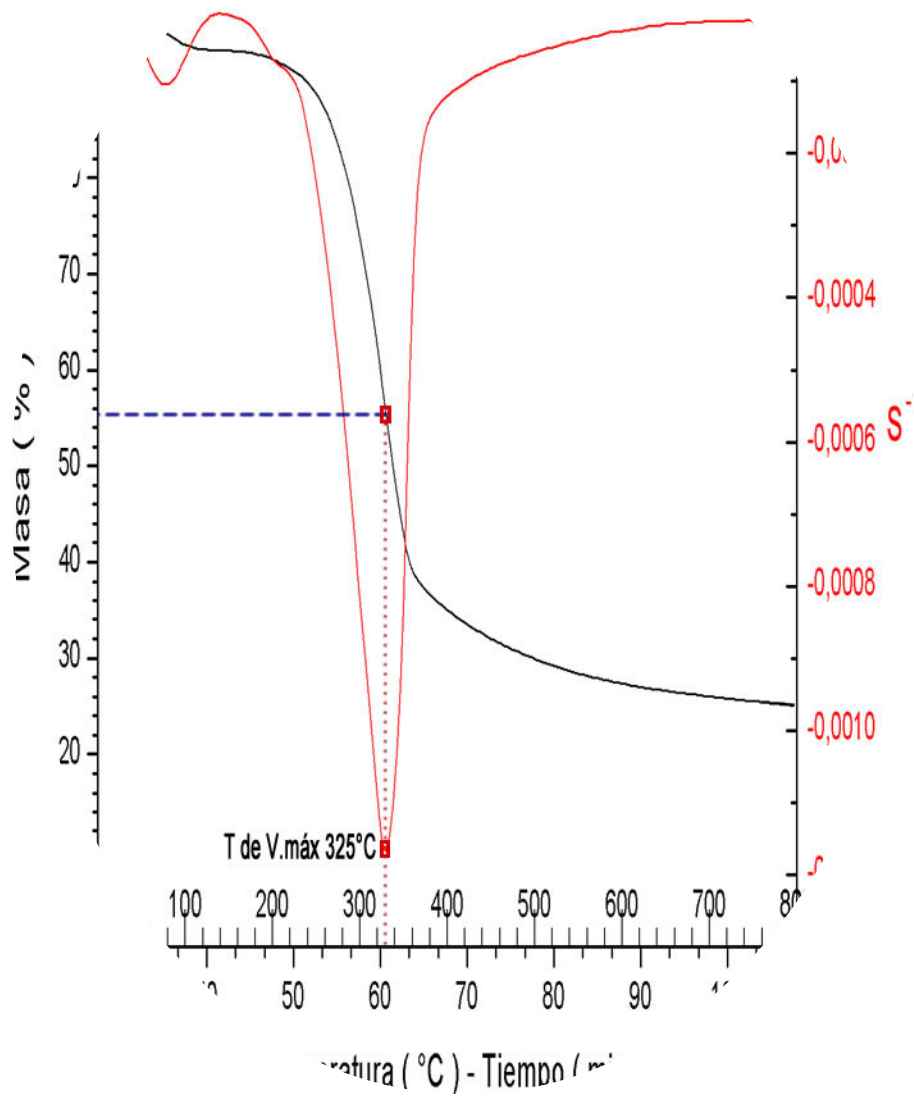
Elementos “MINORITARIOS” de la Guadua Angustifolia UNE-EN ISO 16968:2015			
BIOMASA	ELEMENTO	UNIDADES	RESULTADO
GUADUA ANGUSTIFOLIA KUNTH	Arsénico	mg/kg	<1,0
	Manganeso	mg/kg	2,72
	Cadmio	mg/kg	<0,5
	Cobre	mg/kg	3,13
	Cromo	mg/kg	<1,0
	Níquel	mg/kg	<1,0
	Plomo	mg/kg	<1,0
	Cobalto	mg/kg	<1,0
	Molibdeno	mg/kg	<1,0
	Antimonio	mg/kg	<1,0
	Vanadio	mg/kg	<1,0
	<b>Zinc</b>	<b>mg/kg</b>	<b>11,7</b>

Las concentraciones de los elementos minoritarios en la Guadua Angustifolia Kunth no son significativas. Los elementos cuyas concentraciones muestran mayores valores son el zinc con 11,7 mg/kg, el cobre con 3,13 mg/kg y el manganeso con 2,72 mg/kg.

### CAPÍTULO 3

## ANÁLISIS TERMOGRAVIMÉTRICO DE LA PIRÓLISIS DE LA GUADUA ANGUSTIFOLIA KUNTH

ANÁLISIS DE LA PIRÓLISIS DE LA GUADUA



### **Termogravimetría**

La termogravimetría es una técnica para la caracterización térmica de diferentes tipos de materiales, evaluación de su reactividad y parámetros cinéticos, en la que la muestra es sometida a un programa de calentamiento en una atmosfera específica para observar su pérdida de masa en función de la temperatura y del tiempo. Esta es una forma de conocer el comportamiento de las biomásas cuando son sometidas a diferentes procesos térmicos [62], [63].

La utilización de biomasa con fines energéticos requiere de su completa caracterización. Una técnica que ofrece información privilegiada sobre el comportamiento térmico de la materia prima es el análisis termogravimétrico. Este puede proporcionar información fundamental tal como: el contenido de humedad, el porcentaje de materia inorgánica, la temperatura a la que el material entrega su máxima energía, los intervalos de tiempo en los que ocurren diferentes reacciones y el tiempo de permanencia para la óptima reacción del material [64].

El resultado de un análisis termogravimétrico normalmente se entrega en forma de gráfica. Dicha representación gráfica se denomina termograma o curva termogravimétrica. En ella, se presenta la masa en el eje de ordenadas en valor absoluto o en porcentaje y en el eje de abcisas la temperatura o el tiempo en sus unidades respectivas. Además de las curvas termogravimétricas (TG), se representan las curvas de termogravimetría derivada (DTG), que representan la velocidad de pérdida de peso respecto a la temperatura o el tiempo. A las curvas DTG se les denomina “perfil de combustión” cuando el calentamiento se produce en aire u oxígeno, mientras que se denomina “perfil de pirolisis” cuando se emplea un gas inerte, como el nitrógeno. Algunos parámetros característicos del DTG son las temperaturas inicial, final y de máxima velocidad de desvolatilización (temperatura pico). Asimismo, es posible establecer a partir del TG el porcentaje de pérdida de masa en cada etapa relacionándolo con el proceso químico asociado a la misma [62].

## Análisis termogravimétrico de la pirólisis de la Guadua Angustifolia Kunth

### Pirólisis de la biomasa

La pirólisis es la descomposición termoquímica de la biomasa en ausencia de oxígeno. La reacción endotérmica, por lo que necesita una fuente de energía externa y continua. Los productos de la pirólisis dependen de varios aspectos, tales como la temperatura de pirólisis y la velocidad de calentamiento. A partir de este proceso se obtienen productos en tres estados: líquido (alquitranes, hidrocarburos más pesados y agua), sólido (carbono y materia inorgánica) y gaseoso ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{C}_2\text{H}_2$ ,  $\text{C}_2\text{H}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_6$ ,  $\text{C}_6\text{H}_6$ , etc.) [51]. Dependiendo de las condiciones de operación, el proceso de pirólisis se puede dividir en tres subclases: pirólisis convencional, pirólisis rápida y pirólisis instantánea [65].

**La pirólisis convencional** es la pirólisis que se realiza a bajas velocidades con tiempos de residencia del orden de minutos (normalmente 5 - 30 min). Este tipo de pirólisis origina productos sólidos, líquidos y gaseosos en proporciones significativas [51].

**En la pirólisis rápida (fast pyrolysis)**, el material se calienta rápidamente a temperaturas entre  $300^\circ\text{C}$  y  $600^\circ\text{C}$  en ausencia oxígeno, con un tiempo de residencia muy corto, normalmente menor a 2-3 s y un rápido enfriamiento de los gases. En estas condiciones, se optimiza el rendimiento de líquido para la obtención de bio-aceite [51], [66]. El rendimiento de líquido puede estar entre el 60% y el 75% en peso, el rendimiento de sólido entre el 15% y el 25% en peso y el de gases no condensables entre un 10 % a un 20% en peso [67].

**La pirólisis instantánea (flash pyrolysis)** es un proceso de conversión térmica en la que los tiempos de residencia son extremadamente cortos, entre 30 y 1500 ms según indica Bridgwater [68]. Un rendimiento típico de bio-aceite en pirólisis instantánea puede estar comprendido entre

45 y 75% del total del producto seco pirolizado a unas temperaturas entre 500°C y 600°C [69], [70]. La pirólisis instantánea además de ofrecer altos rendimientos en líquido, también se utiliza para la obtención de productos químicos y gas combustible [51], [65], [67].

#### ***Productos de la pirólisis de biomasa***

Producto sólido: fundamentalmente constituido por carbono con un poder calorífico mayor que el de la biomasa de origen, tomando valores comprendidos entre 30 y 32 MJ/kg [51], [71].

Producto líquido: es un bio-aceite orgánico de color marrón oscuro formado por compuestos altamente oxigenados [67]. Brem y Bramer [70] reportan un poder calorífico de 16,3 MJ/kg para el bio-aceite obtenido mediante pirólisis instantánea de biomasa leñosa, mientras que Bidgwater [72] publica valores de 17 MJ/kg para el bio-aceite obtenido mediante pirólisis rápida de madera.

Producto gaseoso: son los gases no condensables, formados principalmente por CO<sub>2</sub>, CO y CH<sub>4</sub> y una pequeña cantidad de otros hidrocarburos. Este producto gaseoso tiene un poder calorífico en torno a los 10,8 MJ/kg según lo reporta Y.- K. Park [73] en su trabajo de pirólisis rápida de caña salvaje (*Phragmites australis*).

#### **Ensayo de pirólisis convencional de la Guadua Angustifolia Kunth.**

Los ensayos de pirólisis de la Guadua Angustifolia Kunth se realizaron con un analizador termogravimétrico Mettler-Toledo TGA / SDTA851e. Por medio del espectrómetro de masas Pfeiffer Vacuum ThermoStar™ GSD301T, se obtuvo la evolución de los gases de pirólisis. Se trabajó con muestras secas de alrededor de 16 mg con un tamaño de partícula < 200 µm. Se

demonstró la reproducibilidad de los resultados realizando varias determinaciones, obteniéndose en estas un error relativo promedio en toda la curva de pérdida de peso menor de un 1,0%. La pirólisis se llevó a cabo empleando un flujo de nitrógeno de 50 cm<sup>3</sup>/min y una velocidad de calentamiento de 10°C/min desde la temperatura ambiente hasta 800 °C. El flujo volumétrico de nitrógeno empleado garantiza una atmósfera inerte en la muestra durante la ejecución [74]. Por otra parte, la velocidad de calentamiento lenta permite ignorar las limitaciones en la transferencia de calor.

### Curva Termogravimétrica (TG) - Pirólisis Guadua Angustifolia Kunth

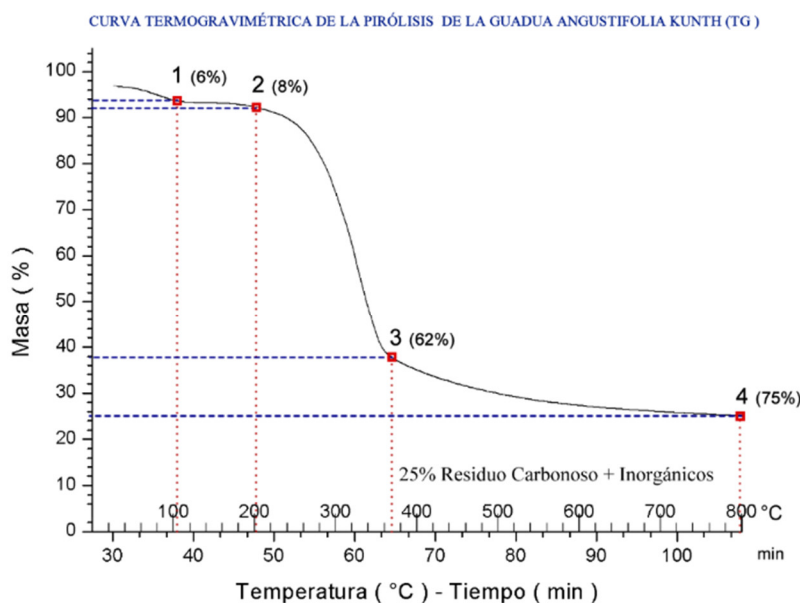


Figura 3.1. Curva TG – Pirólisis Guadua Angustifolia Kunth.

En la **Figura 3.1**, se representa la curva de pérdida de masa de la muestra de Guadua Angustifolia Kunth sometida a pirólisis en atmósfera de nitrógeno, desde temperatura ambiente (del orden de 25°C) hasta aproximadamente 800°C, proceso que duró aproximadamente 80 minutos. En la **Figura 3.1** se observan cuatro puntos que caracterizan el comportamiento general del material en condiciones de pirólisis. Así, el Punto 1, corresponde a una pérdida de masa de un 6%, lo que representa la evaporación de gran parte de la humedad del material. Para el Punto 2, cercano a los 200 °C, se observa una pérdida de masa de aproximadamente 8%, correspondiente a



la pérdida total de la humedad del material y de algunos volátiles, dato concordante con el análisis inmediato de la muestra de Guadua Angustifolia, puesto que la humedad de la muestra es del 7,8% (ad). En el intervalo comprendido entre los Puntos 2 y 3 (el punto 3 está a unos 370 °C), se evidencia el mayor porcentaje de pérdida de masa con una velocidad media de pérdida del 3,2% por minuto (Ecuación 4). En el caso del experimento llevado a cabo en este trabajo, partiendo de una masa total del orden de 16 mg, la velocidad media de pérdida de masa es de 0,5 mg/min, lo que supone una pérdida de masa en el citado intervalo de 8,6 mg, equivalente al 54% de la masa total.

$$VELOCIDAD MEDIA = \frac{\%masa\ inicial - \%masa\ final}{tiempo\ final - tiempo\ inicial} \quad (4)$$

$$VELOCIDAD MEDIA = \frac{62\% - 8\%}{65min - 48min} = 3,2\%/min$$

Del punto 3 al punto 4 se evidencia una lenta pérdida de material, con una velocidad media 10 veces menor a la de la zona comprendida entre los puntos 2 y 3. Además, entre los puntos 3 y 4, la pérdida de masa es sólo el 13% de la masa total. A partir del punto 4, no se evidencia pérdida considerable de masa, pudiéndose atribuir el último porcentaje de masa resultante de la pirólisis al carbono fijo y la materia inorgánica transformada presentes en la muestra. Así, para la Guadua, este porcentaje de masa final del 25%, valor aproximadamente concordante con la suma del carbono fijo (18,8% en peso, ad) y cenizas (3,5% en peso, ad), consignados en el análisis inmediato de la Guadua Angustifolia Kunth (**Tabla 2.1**).

### Curva Derivada Termogravimétrica (DTG) - Pirólisis Guadua Angustifolia Kunth

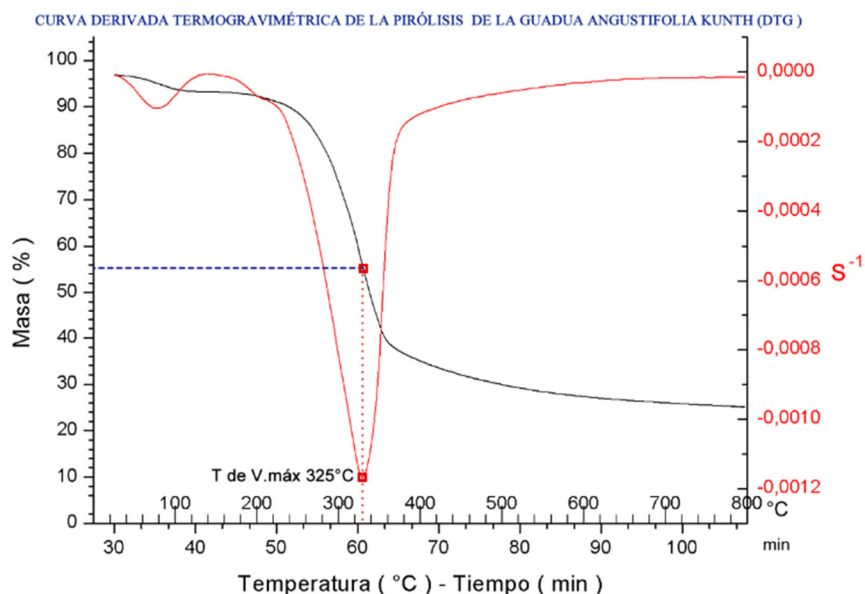
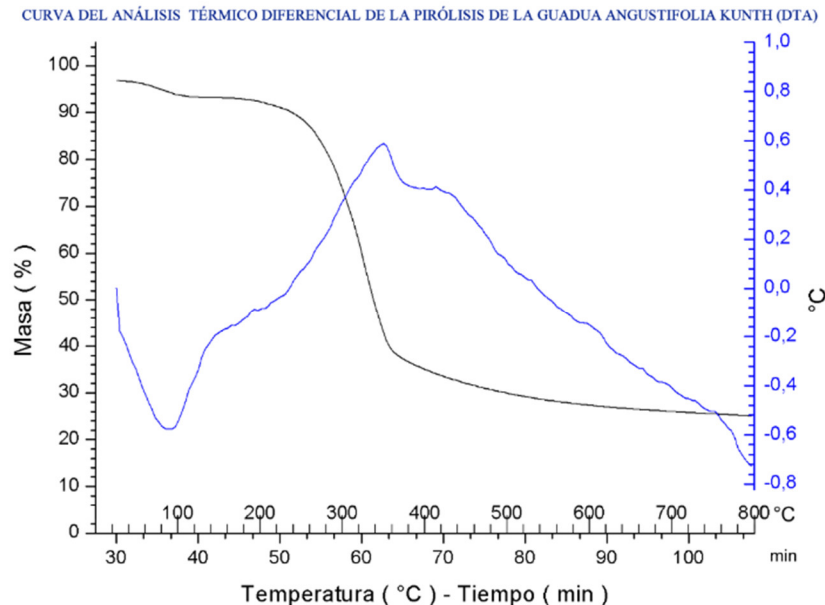


Figura 3.2 Curva DTG- Pirólisis Guadua Angustifolia Kunth.

En la **Figura 3.2** se representa la curva de la derivada respecto al tiempo de la curva termogravimétrica de la pirólisis de la Guadua Angustifolia Kunth (DTG), también denominada “perfil de pirolisis”. Esta curva refleja la velocidad de pérdida de masa de la muestra durante el proceso térmico, identificándose un punto de velocidad máxima a una temperatura próxima a los de 325 °C, lo que se produce 30 minutos después de que la muestra alcanzara los 25 °C. En este instante, la muestra de Guadua presenta la mayor velocidad de descomposición.

### Curva Análisis Térmico Diferencial (DTA) - Pirólisis *Guadua Angustifolia Kunth*



*Figura 3.3 Curva DTA- Pirólisis Guadua Angustifolia Kunth.*

La técnica de DTA (análisis térmico diferencial) está diseñada para identificar cambios energéticos, más no para identificar estructuralmente materiales [75].

En la **Figura 3.3**, correspondiente a la curva del análisis térmico diferencial de la pirólisis de la *Guadua Angustifolia Kunth*, se identifica una zona endotérmica, cercana a los 100 °C, correspondiente a la evaporación de la humedad del material. Posteriormente, existe una etapa exotérmica desde los 237 °C hasta los 533 °C correspondiente a la liberación de volátiles procedentes de la descomposición de la hemicelulosa y celulosa y una etapa final endotérmica de 533 °C a 800 °C, probablemente asociada a la degradación de la lignina y otras reacciones secundarias que producen char [76].

#### **Temperaturas de descomposición la *Guadua Angustifolia* mediante pirólisis.**

La *Guadua Angustifolia Kunth* es una biomasa de tipo lignocelulósico. Según el análisis realizado en este trabajo, (**Tabla 2.3**) está compuesta por un 46,9% (db) de celulosa, un 17,6% (db) de hemicelulosa y un 24,6% (db) de lignina. Según estudios realizados por Raveendran y col.

[77], estos compuestos, presentan comportamientos diferentes durante la pirolisis. Así, la celulosa se descompone en un rango de temperaturas comprendidas entre 250 °C y 500 °C, la hemicelulosa entre 250 °C y 350 °C y la lignina desde los 350 °C hasta temperaturas superiores a los 500°C.

Según Yang y col.[78] la celulosa se descompone entre los 315 °C y los 400 °C, la hemicelulosa entre los 220 °C los 315 °C y la lignina entre los 160 °C y los 900°C.

Quan y col. [79] reportan valores más cercanos a los de Yang y col. [78], mostrando para la celulosa un intervalo de temperaturas de degradación comprendido entre 260 °C y 410 °C, para la hemicelulosa entre 210 °C y 370 °C y para la lignina en un rango más amplio entre 200 °C y 600 °C.

En la **Tabla 3.1** se resumen los intervalos de temperaturas para los que se producen la descomposición térmica de la hemicelulosa, la celulosa y la lignina.

*Tabla 3.1 Intervalo de temperaturas de descomposición de la lignina, la celulosa y la hemicelulosa mediante pirólisis.*

COMPUESTO	TEMPERATURAS DE DESCOMPOSICIÓN	VELOCIDAD DE CALENTAMIENTO	RANGO TEMPERATURA	REFERENCIA
HEMICELULOSA	De 250 °C hasta 350 °C	50 K/min	25 °C a 1000 °C	[77]
	De 220 °C hasta 315 °C	10 °C/ min	25 °C a 900 °C	[78]
	De 210 °C hasta 370 °C	20 °C/ min	25 °C a 800 °C	[79]
CELULOSA	De 250 °C hasta 500 °C	50 K/min	25 °C a 1000 °C	[77]
	De 315 °C hasta 400 °C	10 °C/ min	25 °C a 900 °C	[78]
	De 260 °C hasta 410 °C	20 °C/ min	25 °C a 800 °C	[79]
LIGNINA	De 350 °C hasta > 500 °C	50 K/min	25 °C a 1000 °C	[77]
	De 160 °C hasta 900 °C	10 °C/ min	25 °C a 900 °C	[78]
	De 200 °C hasta 600 °C	20 °C/ min	25 °C a 800 °C	[79]

El hecho de que los intervalos de descomposición sean diferentes puede deberse a las condiciones en las que llevó a cabo la pirolisis, entre las que figuran las distintas velocidades de calentamiento que se emplearon (**Tabla 3.1**).

Además de la información mostrada en la **Tabla 3.1**, se debe tener en cuenta que, tanto para pirolisis de la hemicelulosa como la de la celulosa, aun a 800 °C no se produce una descomposición completa de estos materiales, quedando un residuo sólido del 14% a partir de la hemicelulosa y un 15,6% a partir de la celulosa [79]. Para el caso de la lignina, después de la pirolisis hasta 800 °C, todavía existe un 54% de residuo sólido [79].

La muestra de Guadua Angustifolia empleada en este trabajo posee un 46,9% de celulosa, que, aplicando el porcentaje anterior, dejaría un residuo sólido del **7,3%** tras la pirolisis. Por otra parte, la Guadua contiene un 17,6% de hemicelulosa, lo que originaría un residuo sólido del **2,5%**. Finalmente, el material contiene un 24,6% de lignina, por lo que el residuo de este componente sería el **13,3%** de la masa inicial de la muestra. La suma de estos residuos (23%) proporciona un valor cercano al 25% (aproximadamente coincidente con la suma del carbono fijo y las cenizas), que muestra el final de la curva TG de la pirolisis de la Guadua Angustifolia. (**Figura 3.1**).

Las curvas TG y DTG de la Guadua Angustifolia muestran que a 500 °C su descomposición térmica supera el 94% de la descomposición total que se produce en este proceso. A los 325 °C la Guadua Angustifolia presentó su máxima velocidad de degradación, estos resultados son similares a estudios realizados por termogravimetría a la especie de bambú *D. Giganteus* Munro [71].

### **Determinación de la energía de activación en la pirólisis de la *Guadua Angustifolia* Kunth**

Para el diseño de los reactores que llevan a cabo los procesos de pirólisis y gasificación del bambú u otra biomasa, es esencial conocer la evolución que presenta el material en su descomposición térmica. Así, es necesario obtener la energía de activación para sus diferentes grados de conversión [80],[81]. Aunque existen varios métodos para determinar los parámetros cinéticos, la energía de activación y el factor pre-exponencial, los más aconsejados para la biomasa por su complejidad (se trata de un material heterogéneo) y sus cambios en la progresión de la reacción son los métodos isoconversionales [81]. En estos métodos, para un valor de conversión constante, la velocidad de la reacción es una función sólo de la temperatura [82]. Dentro de los métodos isoconversionales se destaca el método Vyazovkin, que ha sido utilizado por varios autores [83]–[85]. Este método precisa la utilización como mínimo tres velocidades de calentamiento y la determinación del grado de conversión ( $\alpha$ ), junto con el adecuado manejo de los datos, calibración de equipos y la repetibilidad en las mediciones [86], [87]. Hay que tener en cuenta que la energía de activación efectiva puede variar con la temperatura y el grado de conversión o incluso tomar valores negativos [86], [88].

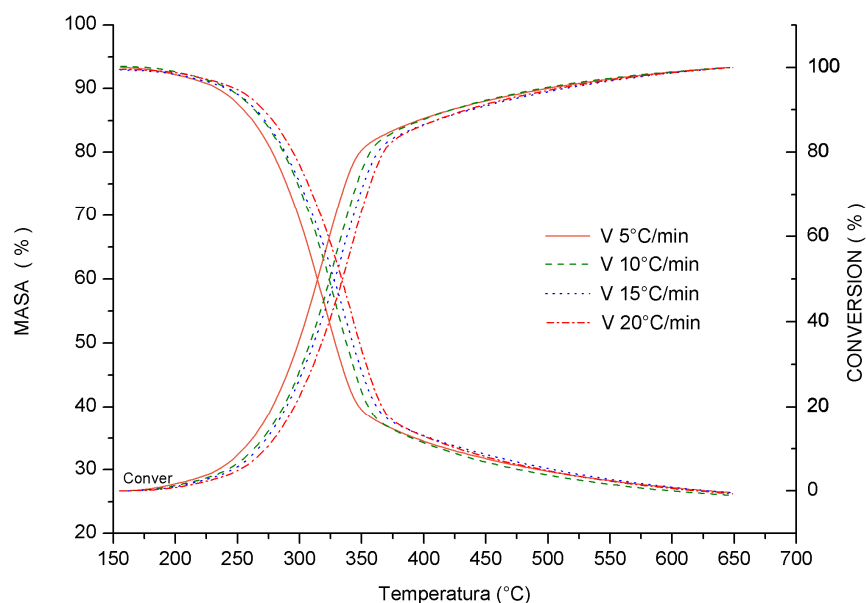
El método Vyazovkin será utilizado en la determinación de los parámetros cinéticos, energía de activación y factor pre-exponencial, de la *Guadua Angustifolia* Kunth.

Para estudiar la cinética, es conveniente seleccionar la parte correspondiente a la pérdida de volátiles y no a la humedad. Según las curvas TG obtenidas a 5°C /min, 10°C /min, 15°C /min y 20°C /min para la *Guadua Angustifolia*, la masa inicial (correspondiente al final de la pérdida de humedad) está alrededor 156 °C y la masa final (correspondiente a la liberación de casi el total de los volátiles) a un valor cercano a los 650 °C.

A partir de los datos obtenidos por termogravimetría a cuatro velocidades diferentes de calentamiento (5 °C/min, 10 °C/min, 15 °C/min y 20 °C/min), se determina el grado de conversión ( $\alpha$ ), en porcentaje, mediante la expresión siguiente:

$$\alpha (\%) = \frac{m_i - m_t}{m_i - m_f} \cdot 100 \quad (5)$$

Donde  $m_i$  es la masa inicial,  $m_t$  la masa en el instante  $t$  y  $m_f$  la masa final. Este cálculo proporciona el grado de conversión ( $\alpha$ ), desde 0 hasta 100% de conversión. Tal como se comentó anteriormente, para la Guadua, la masa inicial es la que corresponde a una temperatura de aproximadamente 156 °C y la final la que corresponde una temperatura de aproximadamente 650 °C. En la **Figura 3.4**, se muestran el TG a las cuatro velocidades de calentamiento y el grado de conversión.



*Figura 3.4. Curva TG y grado de conversión de la pirólisis de la Guadua Angustifolia a 4 velocidades de calentamiento.*

Una vez obtenido el grado de conversión, se calculó la inversa de las temperaturas expresada en grados Kelvin, desde 156 °C hasta la temperatura final aproximada de 650 °C, obteniendo los

valores  $\frac{1}{T(K)}$ . Posteriormente, se calculó la derivada del grado de conversión ( $d\alpha/dt$ ), con el grado

de conversión en tanto por uno, mediante las siguientes expresiones:

$$\frac{d\alpha}{dt} = \frac{1}{m_f - m_i} \cdot \frac{dm}{dt} \quad (6)$$

$$DTG = \frac{dTG}{dt} = \frac{1}{m_0} \cdot \frac{dm}{dt} \Rightarrow \frac{dm}{dt} = m_0 \cdot DTG \quad (7)$$

$$\frac{d\alpha}{dt} = \frac{m_0}{m_f - m_i} \cdot DTG \quad (8)$$

$$\frac{d\alpha}{dt} = \frac{100}{TG_f(\%) - TG_i(\%)} \cdot DTG \quad (9)$$

En la Ecuación 6, el grado de conversión está expresado en tanto por uno. Por otra parte, en la Ecuación 9, el TG está expresado en porcentaje. En las ecuaciones anteriores,  $m_0$  representa la masa inicial de la muestra en el experimento (masa inicial en el TG), mientras que  $m_i$  y  $m_f$  representan las masas inicial y final para el intervalo seleccionado en el estudio cinético, que, como se comentó anteriormente, corresponde aproximadamente a 156 °C y 650 °C. Finalmente,  $m$  representa la masa en un instante  $t$  cualquiera. Análogamente, cuando TG o DTG no tienen subíndice corresponden al instante  $t$  considerado, mientras que los subíndices  $i$  y  $f$  corresponden a la masa inicial y final del intervalo de estudio considerado, respectivamente. A partir de la Ecuación 9, es posible calcular la derivada del grado de conversión para cada temperatura  $y$ , a partir de este valor, su neperiano ( $\ln(d\alpha/dt)$ ).

Con los valores de obtenidos para las distintas velocidades de calentamiento, se construye la **Figura 3.5**, ubicando en el eje (Y) los valores de  $\ln(d\alpha/dt)$  y en el eje (X) los valores de  $\frac{1}{T(K)}$  para los diferentes grados de conversión.



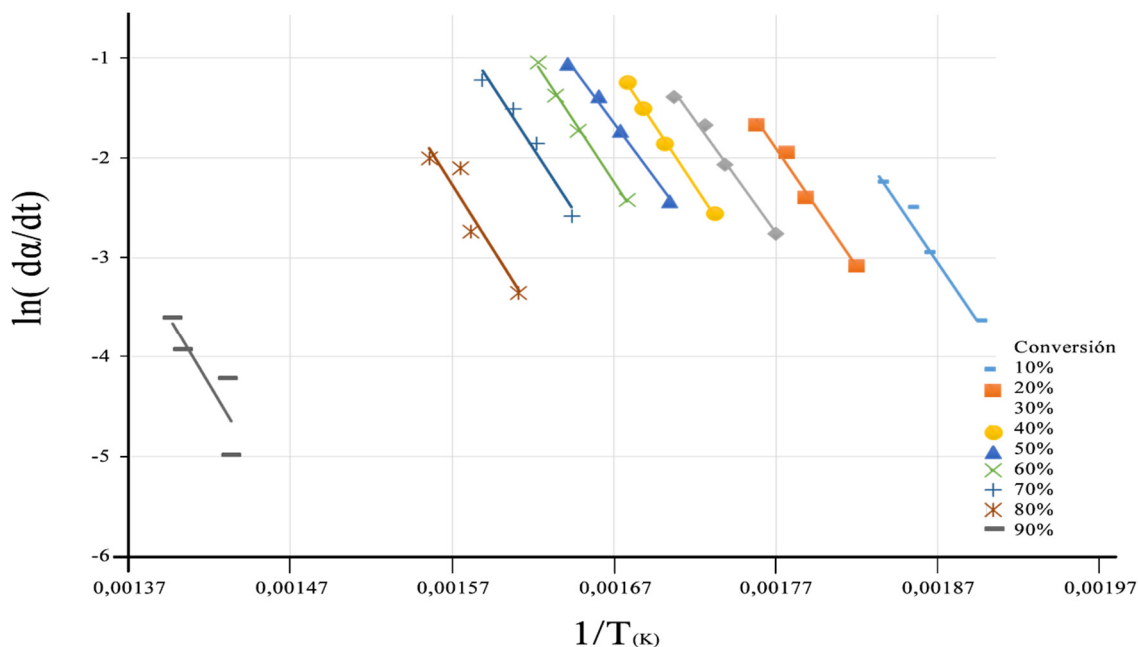


Figura 3.5 Rectas para el cálculo de la energía de activación y factor pre-exponencial de la pirólisis de la *Guadua Angustifolia*

Se realizan varios ajustes lineales de los datos de la **Figura 3.5**. El ajuste responde a la siguiente expresión:

$$\ln\left(\frac{d\alpha}{dt}\right)_{\alpha} = \ln A_{\alpha} + n \ln(1 - \alpha) - \frac{E_{\alpha}}{RT_{\alpha}} \quad (10)$$

En la Ecuación 10, A representa el factor pre-exponencial, E la energía de activación, n el orden de reacción, T la temperatura absoluta y R la constante universal de los gases. El subíndice  $\alpha$  indica que los parámetros están evaluados para un determinado grado de conversión  $\alpha$ . Observando la Ecuación 10, la pendiente de la recta anterior es igual a  $-E_{\alpha}/R$ , donde R es la constante universal de los gases con un valor en 0,00831 kJ/mol K. A modo de ejemplo, para el 50% de conversión, la ecuación de la recta es  $y = -22014x + 35,111$  (**Tabla 3.2**). Por lo tanto, el cálculo de la energía de activación sería:

$$-22014 = \frac{-E_a}{R} \rightarrow E_a = 22014 \times 0,00831 \frac{\text{kJ}}{\text{mol K}} \rightarrow E_a = 182,94 \frac{\text{kJ}}{\text{mol K}}$$

A partir de esta misma ecuación lineal, se obtiene el factor pre-exponencial, tal como se muestra a continuación:

$$\ln A = 35,111 \rightarrow A = e^{35,111} \rightarrow A = 1,77E + 15 s^{-1}$$

El factor pre-exponencial no varía significativamente con el cambio en el orden de la reacción. Dado que el término  $\ln(1 - \alpha)$  es siempre mucho menor que  $\ln A$ , el orden de la reacción no tiene apenas influencia sobre el valor del factor pre-exponencial [89].

Tabla 3.2 Determinación de los parámetros cinéticos para diferentes grados de conversión.

Marcador	$\alpha$ (%)	Ecuación de Recta	Coficiente de Correlación	Energía de Activación $E_a$ (kJ/mol)	Factor Pre-exponencial $A$ ( $s^{-1}$ )
—	10%	$y = -23805x + 41,464$	$R^2 = 0,9768$	197,82	1,02E+18
■	20%	$y = -23449x + 39,597$	$R^2 = 0,9824$	194,86	1,57E+17
◆	30%	$y = -22455x + 36,997$	$R^2 = 0,9898$	186,60	1,17E+16
●	40%	$y = -24303x + 39,521$	$R^2 = 0,9981$	201,96	1,46E+17
▲	50%	$y = -22014x + 35,111$	$R^2 = 0,9948$	182,94	1,77E+15
×	60%	$y = -24722x + 39,043$	$R^2 = 0,9953$	205,44	9,04E+16
+	70%	$y = -24774x + 38,233$	$R^2 = 0,8927$	205,87	4,02E+16
✕	80%	$y = -25744x + 38,151$	$R^2 = 0,8796$	213,93	3,71E+16
—	90%	$y = -27174x + 34,305$	$R^2 = 0,7455$	225,82	7,92E+14

La **Tabla 3.2** contiene las ecuaciones de las rectas de ajuste para los diferentes grados de conversión evaluados, así como los valores de la energía de activación y los factores pre-exponenciales para la pirólisis de la Guadua Angustifolia Kunth.

En la **Figura 3.6** se muestra la relación entre el grado de conversión y la energía de activación y su evolución con respecto a la temperatura. Como puede observarse, para el 50% de conversión, la energía de activación presenta un mínimo. Esto se debe al hecho de que la Guadua Angustifolia presenta su punto de máxima velocidad de degradación aproximadamente a 326 °C en el proceso de pirólisis, tal como puede observarse en la curva de termogravimetría derivada (DTG) de la pirólisis de la Guadua Angustifolia (**Figura 3.2**).

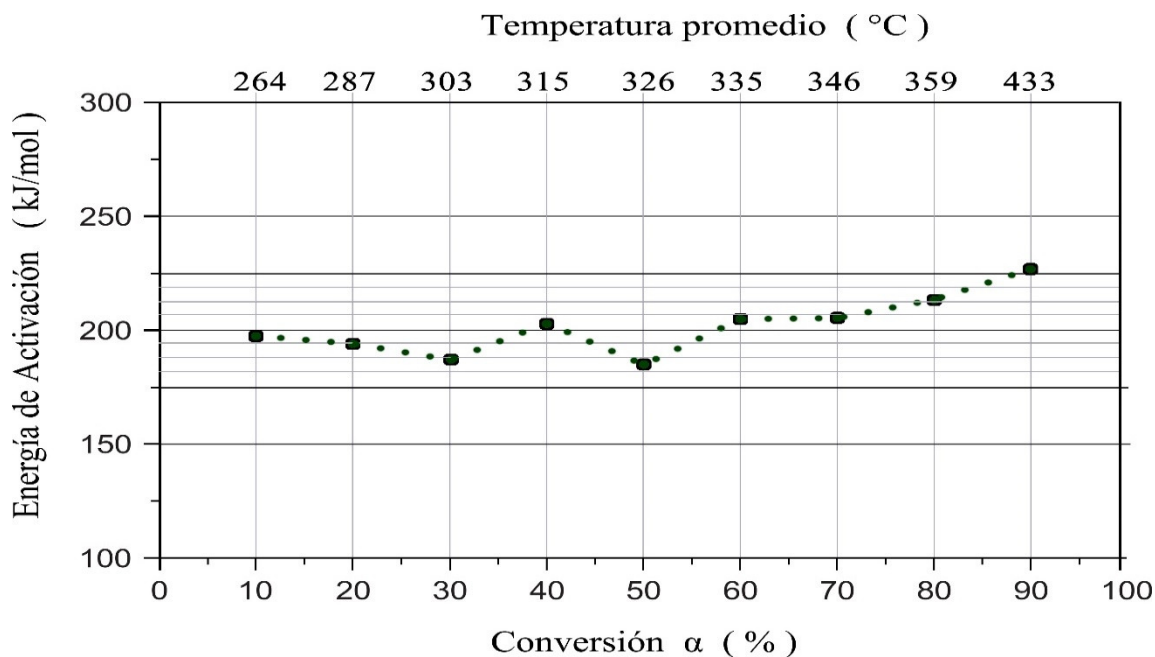


Figura 3.6. Energía de activación de la pirólisis de la Guadua Angustifolia para diferentes grados de conversión.

Los valores de energía de activación obtenidos para la pirólisis de la Guadua Angustifolia Kunth, son similares a los publicados por Yao y col. [90] para varios tipos de biomásas, incluyendo el bambú, por el método de Friedman [91], tal como se observa en la **Figura 3.7**.

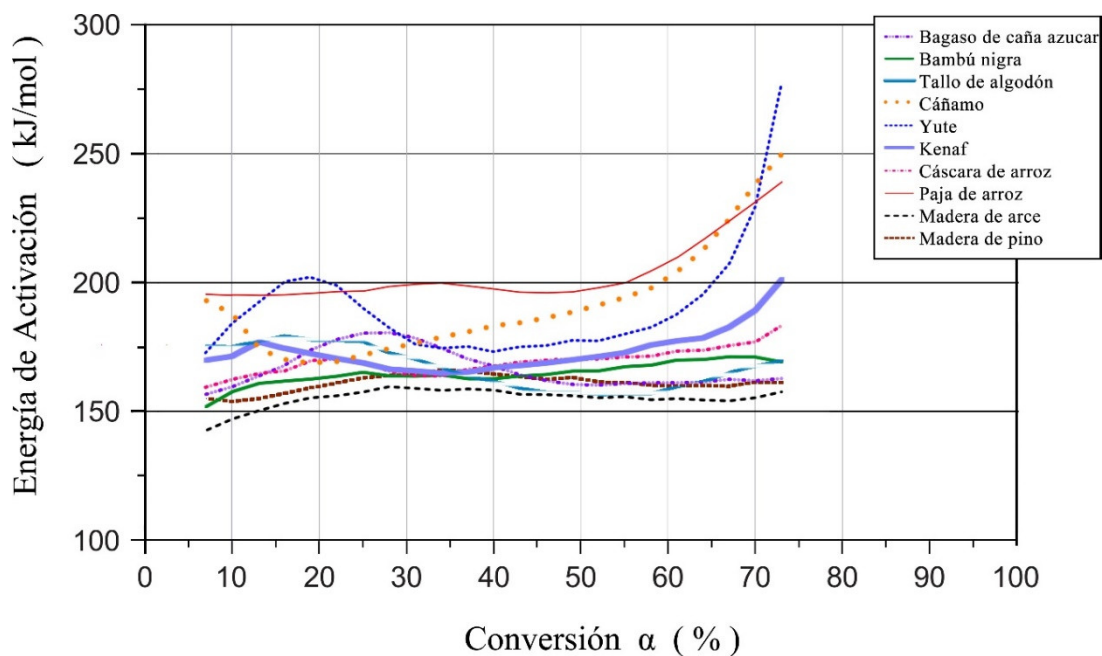
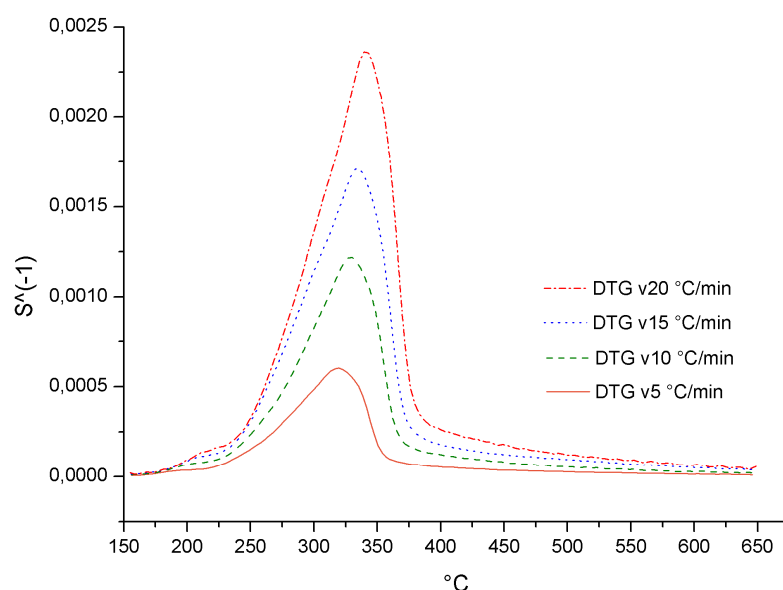


Figura 3.7. Energía de activación de la pirólisis de varios tipos de biomasa para diferentes grados de conversión [90].

Estudios realizados por Jiang y col. [80], utilizando los métodos de Flynn–Wall–Ozawa y Coats–Redfern (modificado), obtuvieron para el bambú Moso, para 7 grados de conversión del 10 al 70% y con temperaturas respectivas entre 260 °C y 400 °C, un rango de valores entre 152,14 kJ/mol y 198,55 kJ/mol. Por otra parte, las energías de activación para los componentes lignocelulósicos de la biomasa, muestran valores de 199,66 kJ/mol para la celulosa, de 95,39 kJ/mol para la hemicelulosa y 174,40 kJ/mol para la lignina [85]. Por otra parte, Jiang y col. [92] publicaron que la energía de activación de la lignina procedente de la yuca es de 172 kJ/mol.

Fernandez y col. [93] estimaron que el consumo energético para la pirólisis de 1 kg de biomasa lignocelulósica con un 10% de humedad a una temperatura de 500°C, sería de aproximadamente el 6,2% de su PCI. Estudios realizados por Van de Velden y col. [94] sugieren que la energía requerida para la pirólisis de gran parte de las biomásas lignocelulósicas varía entre 207 kJ/kg y 434 kJ/kg y en un rango de temperaturas de 200 °C a 400 °C [94]. El intervalo de temperaturas apuntado es muy similar al observado para la pirólisis de la *Guadua Angustifolia Kunth*, según muestran las curvas DTG (**Figura 3.8**).



*Figura 3.8. Curvas DTG a 4 velocidades de calentamiento para la pirólisis de la *Guadua Angustifolia Kunth*.*

### **Compuestos presentes en los gases de la pirólisis de la Guadua Angustifolia Kunth**

Los ensayos de pirólisis de la Guadua Angustifolia Kunth se realizaron con un analizador termogravimétrico Mettler-Toledo TGA / SDTA851e. Por medio del espectrómetro de masas Pfeiffer Vacuum ThermoStar™ GSD301T se determinó la evolución de los gases de pirólisis.

Se trabajó con muestras secas de alrededor de 16 mg con un tamaño de partícula  $< 200 \mu\text{m}$ , y se demostró la reproducibilidad mediante varias determinaciones con un error relativo promedio en toda la curva de pérdida de peso  $< 1,0\%$ . La pirólisis se llevó a cabo bajo un flujo de nitrógeno de  $50 \text{ cm}^3 / \text{min}$  con una velocidad de calentamiento de  $10 \text{ }^\circ\text{C} / \text{min}$  desde la temperatura ambiente hasta  $800 \text{ }^\circ\text{C}$ . Esta tasa de flujo de nitrógeno garantiza una atmósfera inerte en la muestra durante la ejecución [74]. Por otra parte, la velocidad de calentamiento lenta garantiza que las limitaciones de transferencia de calor pueden ignorarse.

Los productos de la pirólisis dependen de varios factores tales como la composición de material, la temperatura de pirólisis, la velocidad de calentamiento y el tiempo de residencia [95]. Sin embargo, a partir del proceso, se obtienen productos en tres estados líquido (alquitranes, hidrocarburos más pesados y agua), sólido (carbono) y gaseoso ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{C}_2\text{H}_2$ ,  $\text{C}_2\text{H}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_6$ ,  $\text{C}_6\text{H}_6$ , etc.) [51].

Gran parte de los gases obtenidos en la pirólisis se condensan formando un bio-aceite. Este está compuesto por familias de ácidos, alcoholes, aromáticos, ésteres, furanos, cetonas, fenoles, azúcares y agua [96]. Por otra parte, los gases no condensables están compuestos principalmente por  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$  y  $\text{CH}_4$  y una pequeña cantidad de otros hidrocarburos de mayor peso molecular. La mezcla de estos gases posee un poder calorífico en torno a los  $10,85 \text{ MJ/kg}$  [73]. En el proceso de la pirólisis a temperaturas superiores a  $600 \text{ }^\circ\text{C}$ , la mayoría del hidrógeno procedente de la biomasa seca se convierte en  $\text{CH}_4$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  y  $\text{C}_2\text{H}_4$  [97],[98]. La **Tabla 3.3** muestra algunos de los gases

obtenidos a partir de la pirólisis de la Guadua Angustifolia Kunth, su masa molecular y la intensidad máxima de los picos asociados al correspondiente compuesto.

*Tabla 3.3. Gases obtenidos a partir de la pirólisis de la Guadua Angustifolia Kunth.*

Nº	FÓRMULA QUÍMICA	COMPUESTO	INTENSIDAD máx. ( nA )	MASA MOLECULAR
1	H <sub>2</sub> O	Agua	0,26000	18,01
2	CH <sub>3</sub> OH	Metanol	0,04300	32,04
3	CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono	0,02400	44,01
4	CH <sub>4</sub>	Metano	0,01920	16,04
5	H <sub>2</sub>	Hidrógeno	0,01900	2,01
6	NH <sub>3</sub>	Amoníaco	0,01500	17,03
7	NO	Monóxido de nitrógeno	0,00600	30,01
8	CO	Monóxido de carbono	0,00460	28,01
9	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	Etileno	0,00290	28,05
10	HCl	Cloruro de hidrógeno	0,00229	36,46
11	CH <sub>3</sub> COOH	Ácido acético	0,00120	60,05
12	H <sub>2</sub> S	Sulfuro de hidrógeno	0,00055	34,10
13	NO <sub>2</sub>	Dióxido de nitrógeno	0,00052	46,00
14	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	Benceno	0,00043	78,11
15	C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> CH <sub>3</sub>	Tolueno	<0,0043	92,14
16	SO <sub>2</sub>	Dióxido de azufre	<0,0043	64,06
17	C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> OH	Fenol	<0,0043	94,11
18	HCN	Cianuro de hidrógeno	<0,0043	27,02

En las Figuras 3.9, 3.10 y 3.11, se muestran las curvas de intensidad para cada uno de los gases de la **Tabla 3.3**, producidos a partir de la pirólisis del material. Se destaca que la mayoría de gases tienen su pico máximo de formación a 325 °C, temperatura a la que se produce la máxima velocidad de degradación de la Guadua Angustifolia durante su pirólisis. El hidrógeno, el benceno y el metanol presentan un comportamiento diferente, produciéndose la máxima intensidad (pico de formación) a temperaturas superiores a 500 °C. Los productos que presentan mayores intensidades, y que por tanto se producen en mayor proporción, son el H<sub>2</sub>O, CH<sub>3</sub>OH, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>, tal como se puede apreciar en la **Tabla 3.3**.

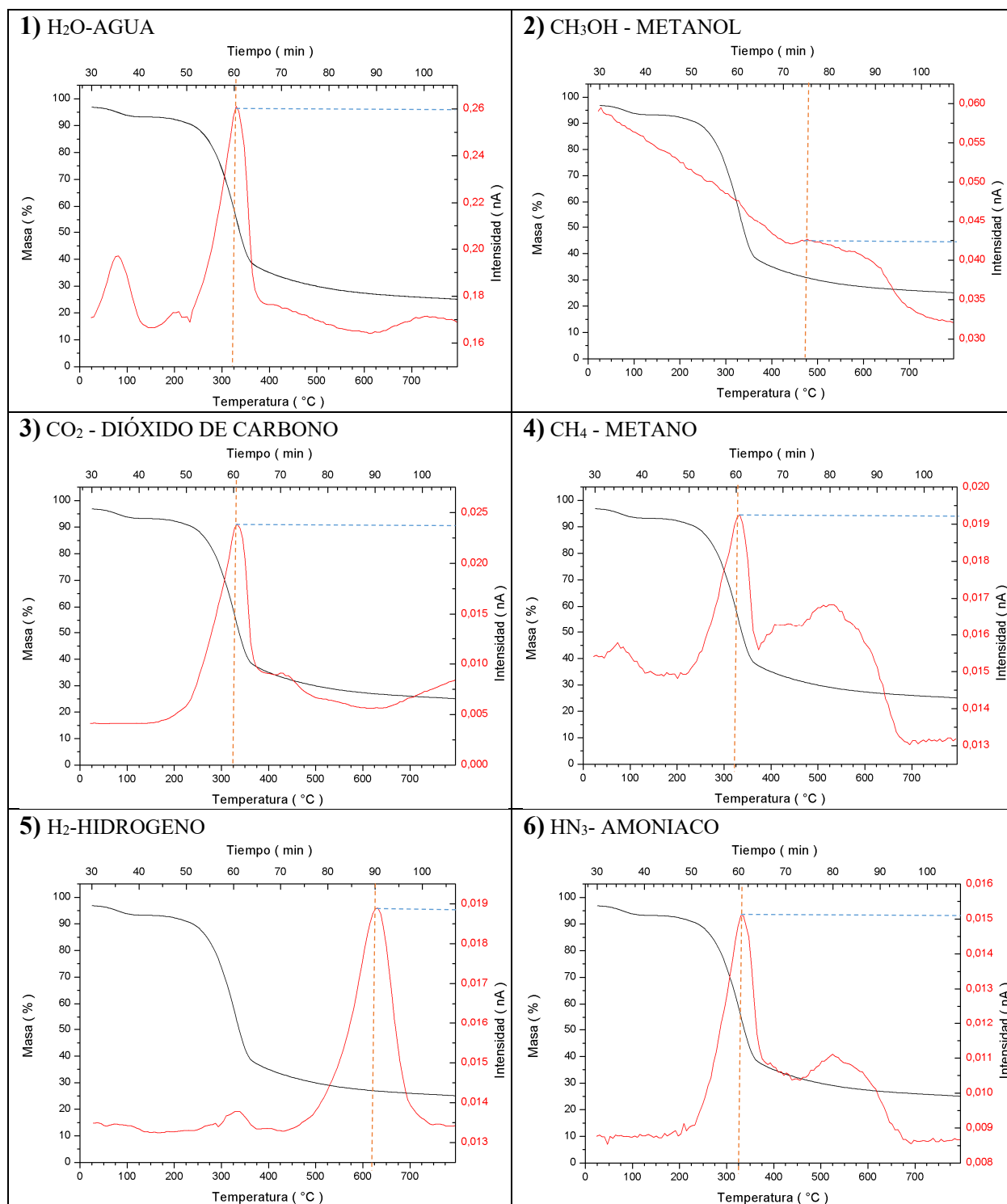


Figura 3.9. Gases obtenidos a partir de la pirólisis de la Guadua Angustifolia Kunth. (compuestos 1 a 6)

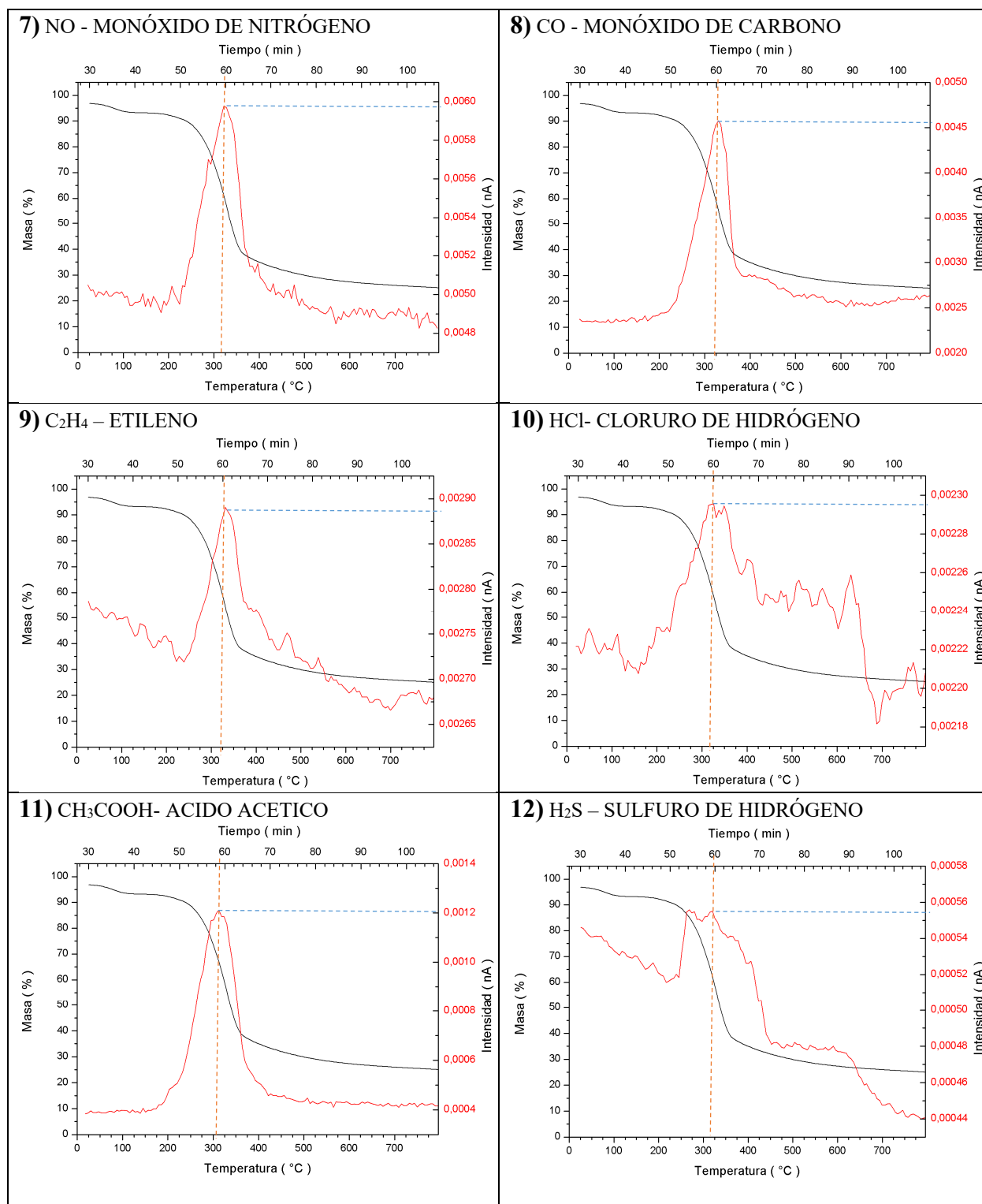


Figura 3.10. Gases obtenidos a partir de la pirólisis de la Guadua Angustifolia Kunth (compuestos 7 a 12).



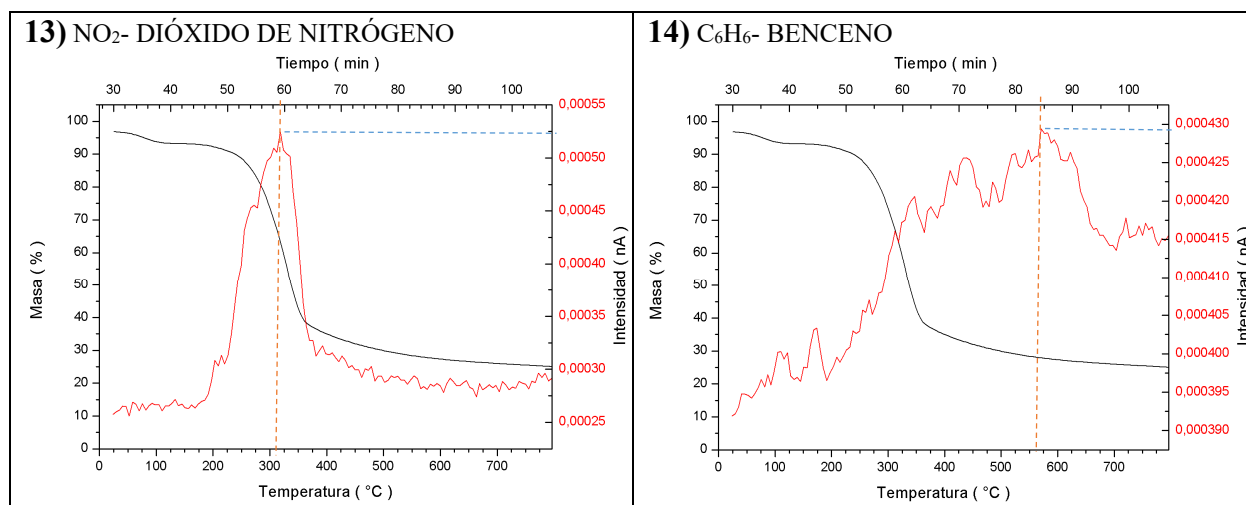


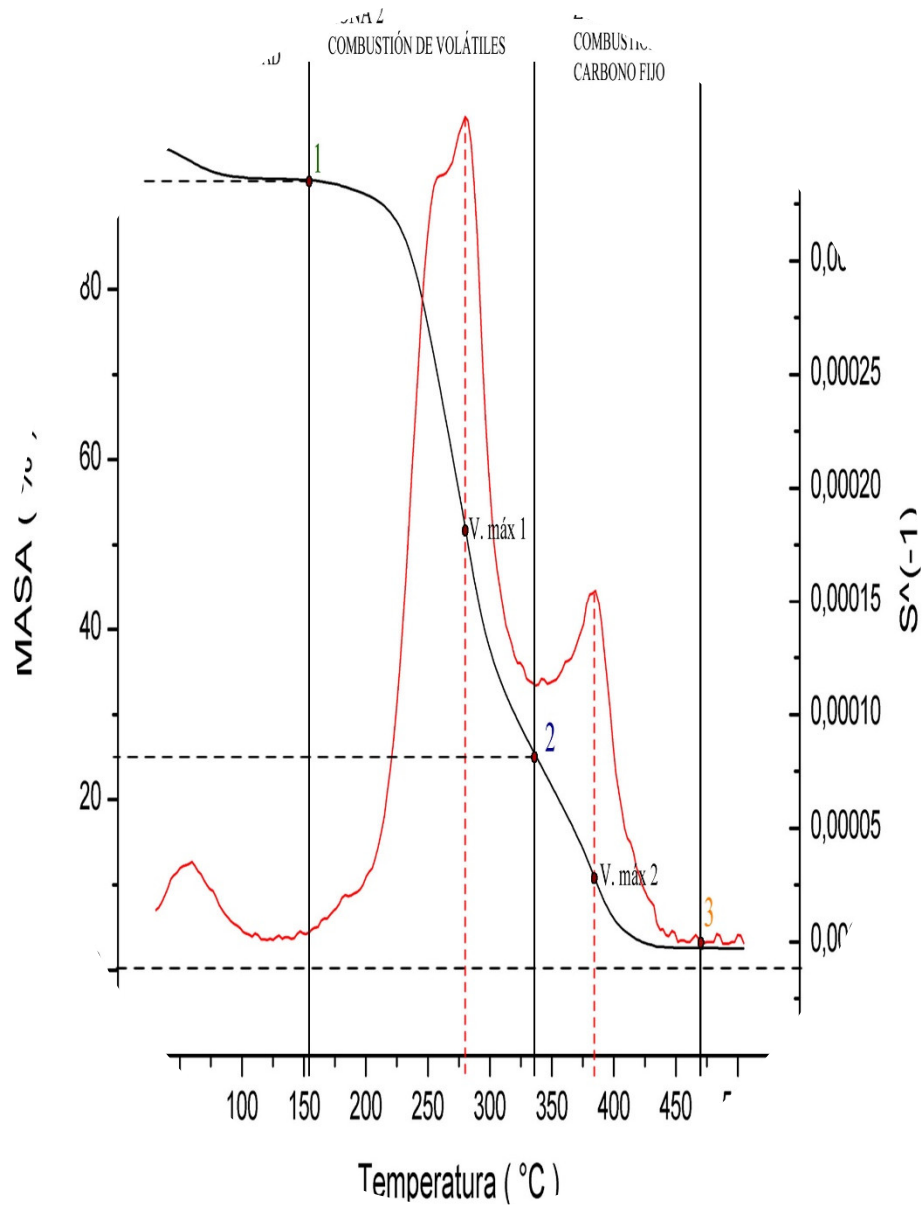
Figura 3.11. Gases obtenidos a partir de la pirólisis de la Guadua Angustifolia Kunt (compuestos 13 a 14).

En la **Figura 3.11** se destaca la formación en pequeñas cantidades (bajas intensidades) de cloruro de hidrógeno y sulfuro de hidrógeno. Estos compuestos generan problemas de corrosión, siendo especialmente indeseables en centrales termoeléctricas por los problemas que producen en tuberías y calderas [30]. Estudios realizados por Scurlock y col. [99] para tres tipos de bambúes del género *Phyllostachys* (especies: *nigra*, *bambusoides* y *bissetii*), obtuvieron muy bajas concentraciones de cloro y azufre en este material (0,03% en peso en base seca de cloro e igual porcentaje de azufre). Mohan y col. [67] hallaron un 0,00079% de productos con cloro a partir de la pirólisis rápida de madera de álamo. Tal como ponen de manifiesto estos datos, las concentraciones de cloro y azufre en la madera y los bambúes son muy bajas. Sin embargo, sería recomendable profundizar en la determinación cuantitativa de estos compuestos en los gases productos de la pirólisis de la Guadua, dados los efectos perjudiciales de este tipo de productos en los equipos y materiales con los que entran en contacto [100]. Por otra parte, los bajos contenidos de azufre de la Guadua Angustifolia Kunth, (**Tabla 2.2**) y las bajas intensidades registradas para el HCl y el H<sub>2</sub>S en los productos de pirolisis (**Figura 3.11**) sugieren que las concentraciones de compuestos con S y Cl en estos productos serán muy bajas, y, como el resto de biomásas, menores que las de los productos obtenidos a partir de la pirolisis de los combustibles fósiles [101],[30].

## CAPÍTULO 4

### ANÁLISIS TERMOGRAVIMÉTRICO DE LA COMBUSTIÓN DE LA GUADUA

#### ANGUSTIFOLIA KUNTH



## **Análisis termogravimétrico de la combustión de la Guadua Angustifolia Kunth**

### **Combustión de Biomasa**

La combustión es una reacción química exotérmica automantenida entre dos elementos, uno llamado combustible, que puede ser sólido, líquido o gaseoso, y el otro llamado comburente, que es un oxidante. Una de las características de esta reacción es la formación de una llama, que es una masa gaseosa incandescente que emite luz y calor. Se diferencia de otros procesos de oxidación muy rápida (detonaciones, deflagraciones y explosiones) por conseguirse el mantenimiento de una llama estable [102], [103].

Para que ocurra la combustión se necesita un combustible, un comburente y un aporte de energía que permita alcanzar la energía de activación de la reacción. El comburente generalmente utilizado es el oxígeno. Este está contenido en el aire en una proporción aproximada del 21% y el resto es nitrógeno. Este es el porcentaje en volumen de  $O_2$  que suele considerarse en cálculos de combustión, con el objeto de facilitar los cálculos, ya que el aire también contiene, aunque en menor proporción,  $H_2O$ ,  $CO_2$  y otros gases [104],[100].

Cuando se utiliza el aire en un proceso de combustión, su contenido de nitrógeno es responsable de la formación no deseada de  $NO_x$  y dicha formación lleva asociada un consumo de energía [105].

La velocidad de combustión de la biomasa pulverizada es considerablemente más alta que la de los carbones. Por otra parte, el empleo de combustibles biomásicos proporciona beneficios sustanciales en términos medioambientales, dado que, durante su crecimiento, la biomasa captura el dióxido de carbono que luego emite durante su combustión [30],[106].

Las propiedades de la biomasa determinan su comportamiento como combustible, de ahí que su proceso de combustión dependa de varios factores, como su composición estructural, su

contenido de humedad, etc. El proceso de combustión se subdivide en varias fases: secado, pirolisis y/o gasificación y combustión [30], [107].

Las primeras fases en la combustión de la biomasa u otro combustible sólido, serán el secado y la pirolisis / gasificación. En la combustión en estufas de leña tiene lugar una gran superposición entre las fases [108].

En la combustión de biomasa con aire, se generan numerosos productos, entre ellos dióxido de carbono, vapor de agua, nitrógeno. También suele haber cierta cantidad de oxígeno no utilizado en la combustión. Además de los compuestos anteriores, en el gas de combustión suelen estar presentes algunos contaminantes atmosféricos como monóxido de carbono, hidrocarburos (HC), óxidos de nitrógeno y azufre y también partículas sin quemar (hollín) [100].

### **Ensayo de combustión de la Guadua Angustifolia Kunth**

Los ensayos de combustión de la Guadua Angustifolia Kunth se llevaron a cabo con un analizador termogravimétrico Mettler-Toledo TGA / SDTA851e.

Para determinar la evolución de los gases de combustión, se usó un espectrómetro de masas Pfeiffer Vacuum ThermoStar™ GSD301T. Se utilizaron muestras secas de alrededor de 15 mg con un tamaño de partícula  $< 200 \mu\text{m}$ , y se demostró la reproducibilidad de los análisis realizándose varias determinaciones y obteniéndose un error relativo promedio en toda la curva de pérdida de peso  $< 1,0\%$ . La combustión se llevó a cabo bajo un flujo de oxígeno de  $50 \text{ cm}^3 / \text{min}$  con una velocidad de calentamiento de  $10 \text{ }^\circ\text{C} / \text{min}$  desde la temperatura ambiente hasta  $800 \text{ }^\circ\text{C}$ . Esta tasa de flujo de oxígeno garantiza una atmósfera oxidante en la muestra durante el análisis. Por otra parte, la velocidad de calentamiento lenta garantiza que las limitaciones de transferencia de calor pueden ignorarse [74].

### Curva Termogravimétrica (TG) - Combustión Guadua Angustifolia Kunth

En la **Figura 4.1** se representa la curva de pérdida de masa de la muestra de Guadua Angustifolia Kunth sometida a combustión en atmósfera de oxígeno, desde temperatura ambiente (25 °C) hasta 800 °C con una velocidad calentamiento de 10 °C /min.

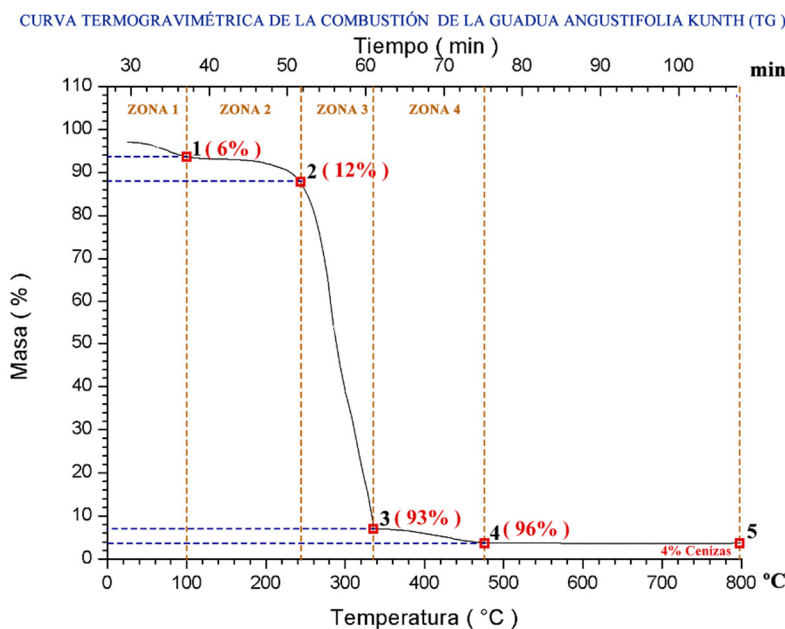


Figura 4.1. Curva TG - Combustión de la Guadua Angustifolia Kunth.

En la **Figura 4.1** se identifican cuatro zonas que caracterizan el comportamiento general del material en condiciones de combustión. En la zona 1, que va desde el inicio del proceso térmico hasta el punto 1, se produce una pérdida de masa del 6%, que corresponde a la evaporación de gran parte de la humedad del material. En la zona 2, (del punto 1 al punto 2), la Guadua pierde otro 4%, lo que tiene lugar desde los 100 °C hasta una temperatura cercana a los 240 °C. A esta temperatura, se habrá evaporado el total de la humedad del material y parte de los volátiles ligeros. A partir de los 240 °C, zona 3, se observa una aceleración de la velocidad de descomposición del material, hasta 340°C. En este instante (punto 3), la pérdida de masa ya es del 93%, zona altamente energética por la naturaleza exotérmica de las reacciones de oxidación de la mayor parte del material.

En la zona 4 (del punto 3 al punto 4), se observa una disminución de la velocidad de la descomposición, produciéndose una pérdida total de masa de un 3%. Por lo tanto, para una temperatura de 480 °C (punto 4), el 96% de la muestra de Guadua Angustifolia Kunth se ha descompuesto u oxidado. Después del punto 4, no se observa una pérdida significativa de masa, a pesar de que la temperatura se elevó hasta los 800 °C. Así, el restante 4% del punto 4 representa las cenizas de la Guadua, valor concordante con el 3,8% obtenido en el análisis inmediato (Tabla 2.1).

### Curva Derivada Termogravimétrica (DTG) - Combustión Guadua Angustifolia Kunth

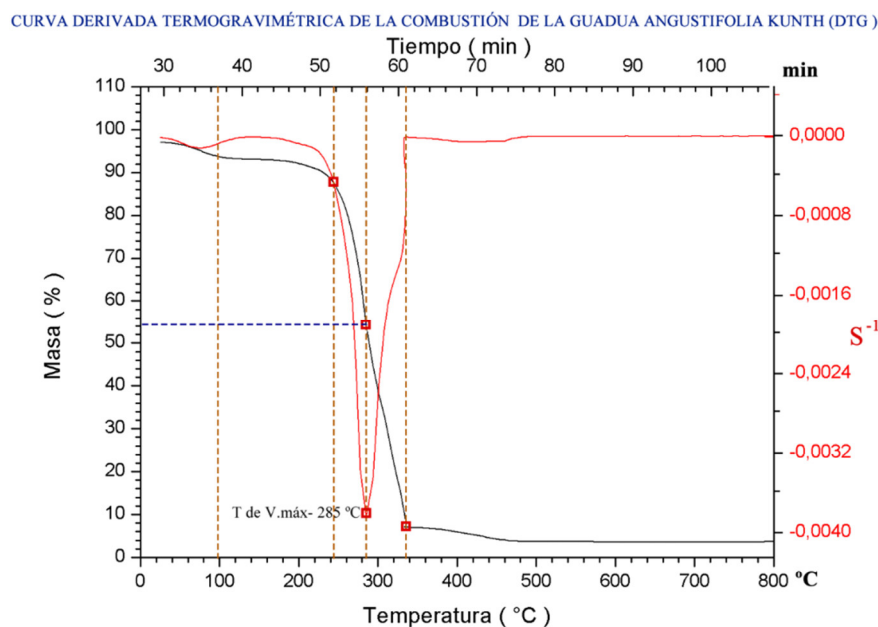


Figura 4.2. Curva DTG- Combustión de la Guadua Angustifolia Kunth.

En la **Figura 4.2** se muestra el perfil de combustión de la Guadua Angustifolia Kunth, que refleja la velocidad de pérdida de masa de la muestra durante el proceso térmico. En la figura se observa un punto de velocidad máxima a una temperatura próxima a los 285 °C, que se alcanzó a aproximadamente a los 56 minutos de haber comenzado el experimento. Este punto de velocidad máxima se sitúa aproximadamente en la mitad entre los puntos 2 y 3 anteriormente mencionados

en la curva TG (**Figura 4.1**) y correspondientes a las temperaturas respectivas de 240 °C y 340 °C. Si se calcula la velocidad media de la reacción en este intervalo con la Ecuación ( 4 ), se obtiene un valor del orden de 8,1%/min. Puesto que la muestra de Guadua empleada fue de 14,6615 mg, dicha velocidad media es de 1,18 mg/min. Así, entre 240 °C y 340 °C, transcurrieron 10 minutos y reaccionó el 81% de la Guadua, lo que es lo mismo 11,88 mg del total de la muestra.

### Curva Análisis Térmico Diferencial (DTA) - Combustión Guadua Angustifolia Kunth

CURVA DE ANÁLISIS TÉRMICO DIFERENCIAL DE LA COMBUSTIÓN DE LA GUADUA ANGUSTIFOLIA KUNTH (DTA)

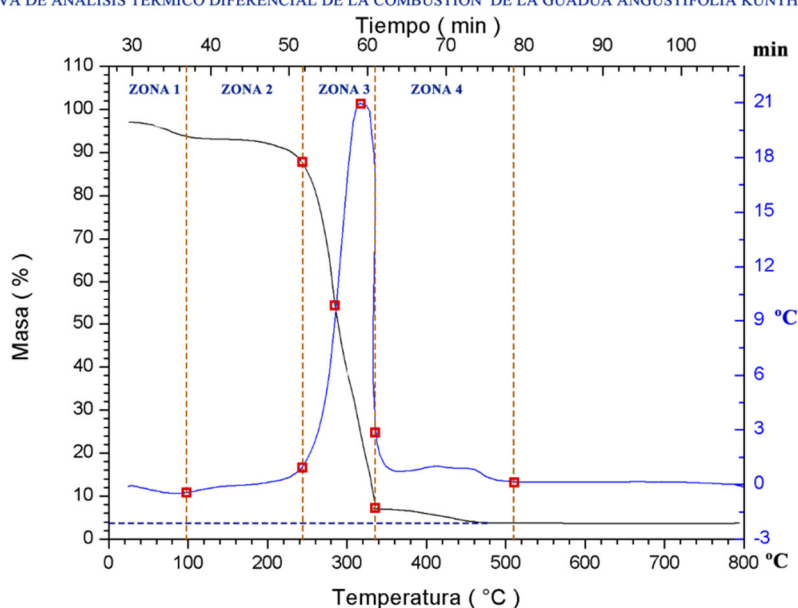


Figura 4.3. Curva DTA- Combustión de la Guadua Angustifolia Kunth.

La **Figura 4.3** es la curva de análisis térmico diferencial correspondiente a la combustión de la Guadua Angustifolia Kunth. En esta curva se observa un zona endotérmica hasta los 176 °C, correspondiente a la evaporación de la humedad del material y la pérdida de parte de los volátiles, seguido de una etapa altamente exotérmica desde los 200 °C y los 340 °C, en la que se continúa la desvolatilización, la combustión de estos y del carbono fijo (char). Esta es la zona en la que la velocidad de reacción es más alta. En la zona 4, de 340 °C a 510 °C, la pérdida de masa es muy pequeña y la velocidad de reacción es más baja.

Si se comparan los perfiles de pirolisis y combustión de la Guadua (DTGs) (**Figura 3.2** y **Figura 4.2**), se observa que la etapa de desvolatilización de la combustión (pirolisis oxidativa), transcurre a velocidades mucho más altas que la de la pirolisis. Además, el intervalo de temperaturas de desvolatilización es más estrecho, siendo para la combustión aproximadamente 209 °C – 315 °C mientras que para la pirolisis 209 °C – 370 °C. La aceleración que experimenta la desvolatilización durante el proceso de combustión, puede ser debida a dos factores: a) el empleo de un flujo de oxígeno puro y b) la presencia de altas concentraciones de potasio en la Guadua. Los compuestos de potasio presentes en la Guadua (sales) podrían actuar como catalizador, debilitando los enlaces C-C de la materia orgánica mediante un mecanismo de transferencia de oxígeno [109]. De esta forma, el K podría promover la oxidación heterogénea de la fracción pirolizable de la Guadua a baja temperatura. Esto podría constituir una ventaja importante a la hora de gasificar la Guadua en un gasificador en corriente descendente.

La comparación de los perfiles de combustión y pirolisis de la Guadua Angustifolia fueron analizados y presentados en una comunicación para el congreso ICEER 2019 (Aveiro, Portugal). La comunicación se recoge en el Anexo 2 de esta Tesis Doctoral.

### **Temperaturas características de la combustión de la Guadua Angustifolia**

Cuando se pretende utilizar una biomasa con fines energéticos, aparte de determinar su composición elemental, su humedad, rendimiento en cenizas y materia volátil y poder calorífico, es necesario obtener su perfil de combustión. Esto con el ánimo de determinar su temperatura de ignición, temperatura de máxima velocidad de descomposición, temperatura final del proceso y el tiempo de permanencia del combustible para su óptima combustión. El perfil de combustión se puede obtener por la técnica de termogravimetría [64], [110].



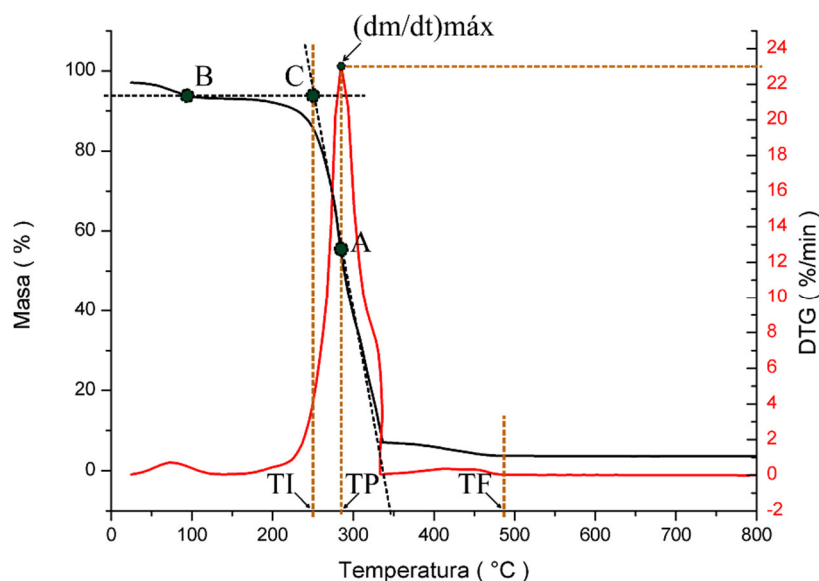


Figura 4.4. Perfil de combustión de la *Guadua Angustifolia Kunth*.

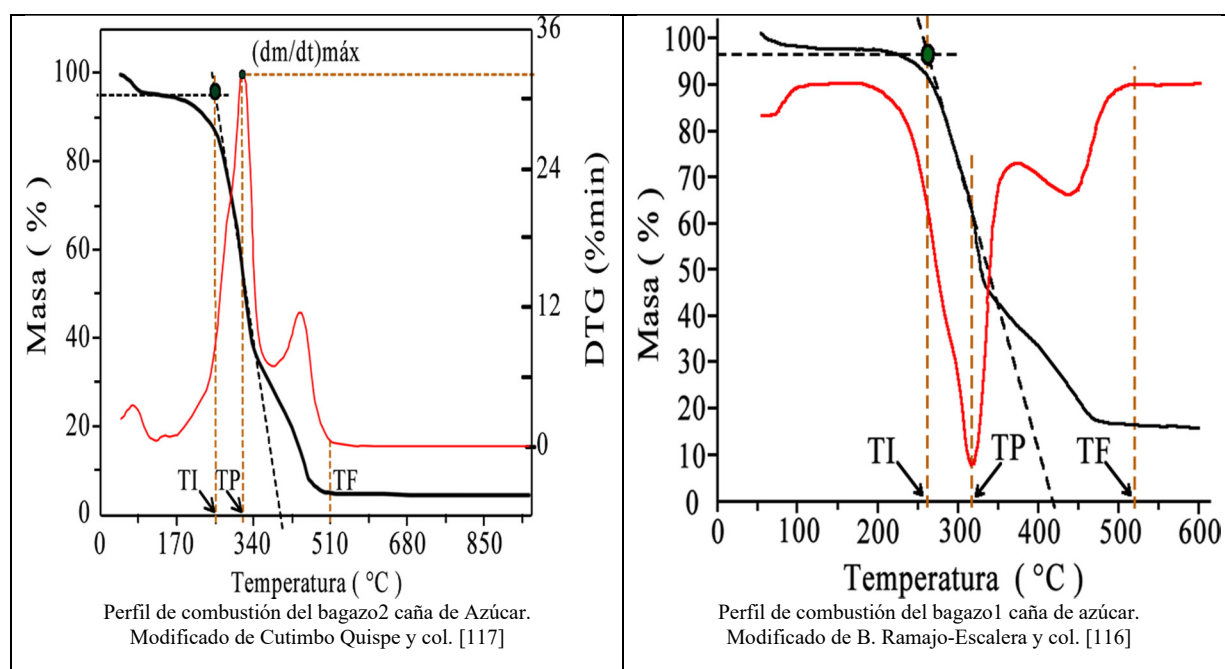
La temperatura de ignición (TI) se puede determinar mediante el análisis de las curvas TG - DTG de la combustión del material, tal como ilustra la **Figura 4.4**. Para obtenerla, se traza una línea vertical que corta la curva TG e intersecta el valor pico de la curva DTG (punto A). Después, se dibuja una recta tangente a la curva TG en el punto A y otra línea horizontal que pase por el punto B (punto en el que la muestra comienza a perder peso significativamente). Estas dos rectas se cortan en el punto C; punto al que corresponde la temperatura de ignición, [111], [112]. Varios autores [113]–[115] han utilizado este procedimiento para determinar la temperatura de ignición por termogravimetría para diferentes biomásas y tipos de carbones.

La temperatura pico (TP), de máxima velocidad de descomposición, se obtiene por medio de la curva DTG, identificando el pico máximo y su correspondiente temperatura.

La máxima velocidad de descomposición  $(dm/dt)_{máx}$ , se deduce del análisis de la curva DTG. Este generalmente suele estar expresado en  $s^{-1}$ , %/s, %/min, mg/s o mg/min.

La temperatura final (TF) es aquella para la que no se evidencia pérdida de masa considerable en la curva TG y, en la curva DTG, la velocidad de pérdida de peso es menor a 0,1%/min [64].

La **Figura 4.4** ilustra la determinación de las temperaturas características sobre el perfil de combustión de la Guadua Angustifolia Kunth. Aplicando este criterio, en la **Figura 4.5**, se analizan las curvas TG y DTG de la combustión de bagazo de caña de azúcar de dos estudios independientes [116], [117], obteniéndose sus temperaturas características.



*Figura 4.5. Perfiles de combustión del bagazo de caña de azúcar. Modificado de [117], [116].*

Rojas y Barraza [64] emplearon otro criterio para la determinación de las temperaturas características de combustión de dos de carbones colombianos (Cerrejón y Yolanda) y uno inglés (Thoresby). De acuerdo con Rojas y Barraza [64], la temperatura de ignición (TI) se determina para el instante en el que la velocidad de pérdida de peso de la muestra fue superior a 0,1%/min durante la etapa de quemado del material combustible. Por otra parte, la temperatura pico (TP) corresponde al instante en el que la velocidad de pérdida de masa es máxima y la temperatura final (TF) para el instante en el que la velocidad de pérdida de masa fue menor de 0,1%/min y se

evidenció que el combustible se había consumido casi en su totalidad [64]. En este trabajo, el análisis se realizó con ayuda de las curvas TDG de la combustión de los carbones, tal como se observa en la **Figura 4.5**.

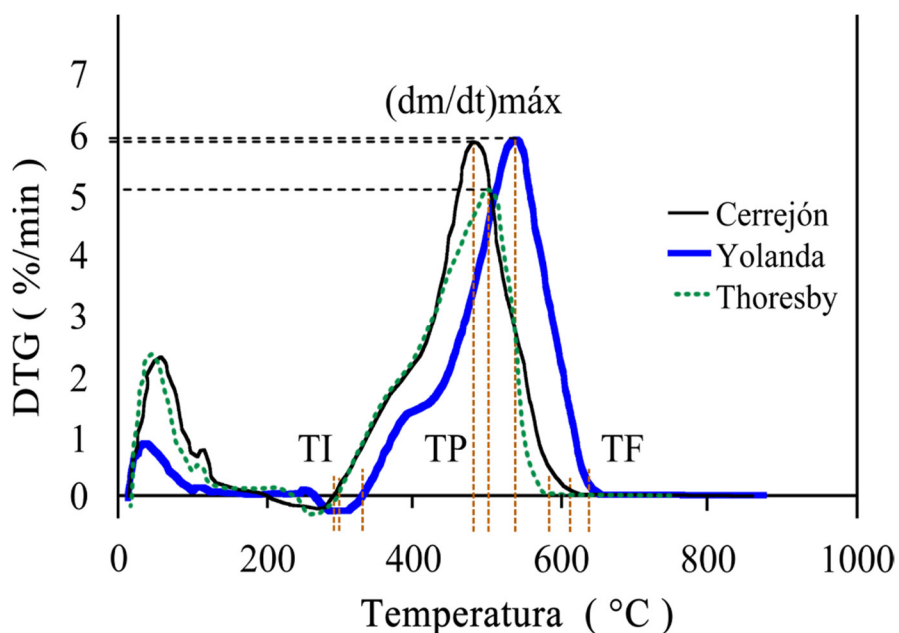


Figura 4.6. Perfil de combustión de carbones colombianos (Cerrejón, Yolanda) e inglés (Thoresby).

Modificado de Rojas y Barraza [64].

Tabla 4.1. Perfiles de combustión de diferentes combustibles sólidos.

COMBUSTIBLE SÓLIDO	Temperatura de ignición TI, °C	Temperatura pico TP, °C	Temperatura final TF, °C	TF-TI °C	(dm/dt) <sub>máx</sub> %/min	REFERENCIA
Guadua Angustifolia	250	285	480	230	23,06	
Carbón Yolanda	338	537	642	304	5,90	[64]
Carbón Thoresby	305	500	578	273	5,09	[64]
Carbón Cerrejón	300	497	614	314	5,84	[64]
Bagazo 1 Caña de Azúcar	260	320	520	260	> 20 **	[116]
Bagazo 2 Caña de Azúcar	255	320	510	255	31,80	[117]

*\*\* B. Ramajo-Escalera y col [116] no reportan  $(dm/dt)_{m\acute{a}x}$ , pero su curva TG presenta una evolución y temperaturas características con valores muy cercanos a los aportados por Cutimbo Quispe y col. [117], por lo que se puede inferir que su  $(dm/dt)_{m\acute{a}x}$  tendrá un valor similar y siempre  $>20\%/min$  según su DTG.*

En la **Tabla 4.1** se relacionan los datos de los perfiles de combustión extraídos del análisis de las curvas de **Figura 4.5, 4.5 y 4.6**. En ella se destacan las bajas temperaturas de ignición de la Guadua Angustifolia y el bagazo de caña de azúcar, comparado con los carbones. Por otra parte, deben destacarse sus elevadas velocidades de descomposición a temperaturas pico muy inferiores a los carbones. Esto es debido a que la velocidad de combustión de la biomasa es considerablemente más alta que la este tipo de combustible sólido [30], [106].

Vamvuka y col. [113] utilizando el método de análisis de las curvas TG-DTG determinaron temperaturas de ignición entre 236 °C y 270 °C para biomásas con contenido de material volátil de hasta el 78% en peso. Jones y col [114] coinciden con este rango de temperaturas de ignición para biomásas utilizando técnicas termogravimétricas para su determinación.

De lo anterior se puede inferir que la Guadua Angustifolia, en el proceso de combustión, presentaría un grado medio de reactividad con respecto a las otras biomásas. Por otra parte, dada su baja temperatura final (TF) de combustión, precisaría menores tiempos de residencia en este proceso térmico, lo que permitirá procesar mayores volúmenes en comparación con otras biomásas o con carbones.

### **Determinación de la energía de activación en la combustión de la Guadua Angustifolia**

#### **Kunth (2,5 °C/min )**

El conocimiento de la reactividad de la biomasa es fundamental para el diseño y la operación de su proceso de conversión termoquímica [118].

Para la determinación de la energía de activación y el factor pre-exponencial de la Guadua Angustifolia en el proceso de combustión, se utilizó el método de Coats–Redfern. Este método se

ha probado con un gran número de biomásas para la determinación de los parámetros cinéticos, mostrando que es un método acertado para el análisis cinético de la combustión de la biomasa [119], [120].

Coats–Redfern es un método integral para analizar la cinética en un proceso no-isotérmico. La velocidad de conversión de la sustancia durante el proceso térmico, para un experimento termogravimétrico que tiene lugar a una velocidad constante de calentamiento viene dada por la expresión siguiente:

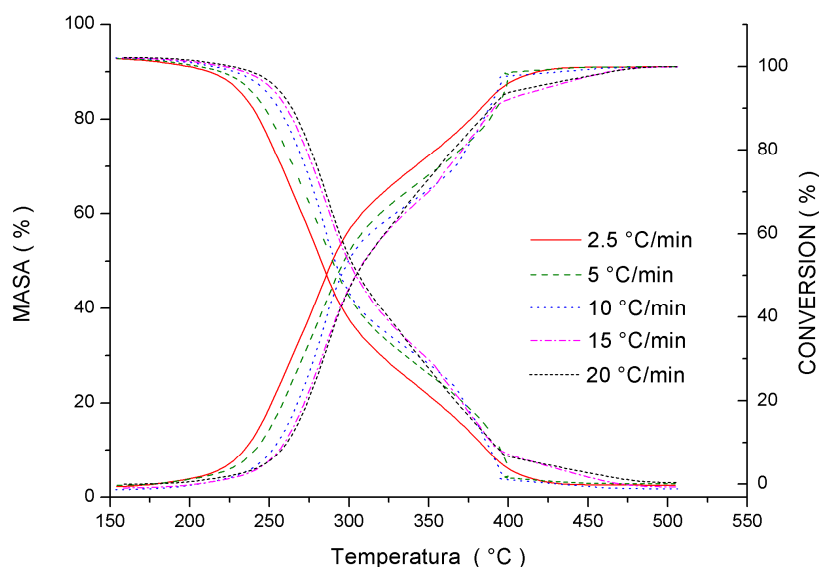
$$\frac{d\alpha}{dT} = \frac{A}{\beta} \exp\left(\frac{-E}{RT}\right) f(\alpha) \quad (11)$$

Donde A es el factor pre-exponencial, E la energía de activación,  $\beta$  la velocidad de calentamiento, R la constante universal de los gases 0,00831 kJ/mol K y  $f(\alpha)$  es una función del grado de conversión. Generalmente, para la función  $f(\alpha)$  se ha considerado que el mecanismo de reacción es de primer orden, por lo que dicha función viene dada por la expresión  $(1-\alpha)$  [120]. Para resolver la Ecuación 11, esta se integra y se linealiza, obteniéndose la Ecuación 12 [121].

$$\ln\left[\frac{-\ln(1-\alpha)}{T^2}\right] = \ln\frac{AR}{\beta E} - \frac{E}{RT} \quad (12)$$

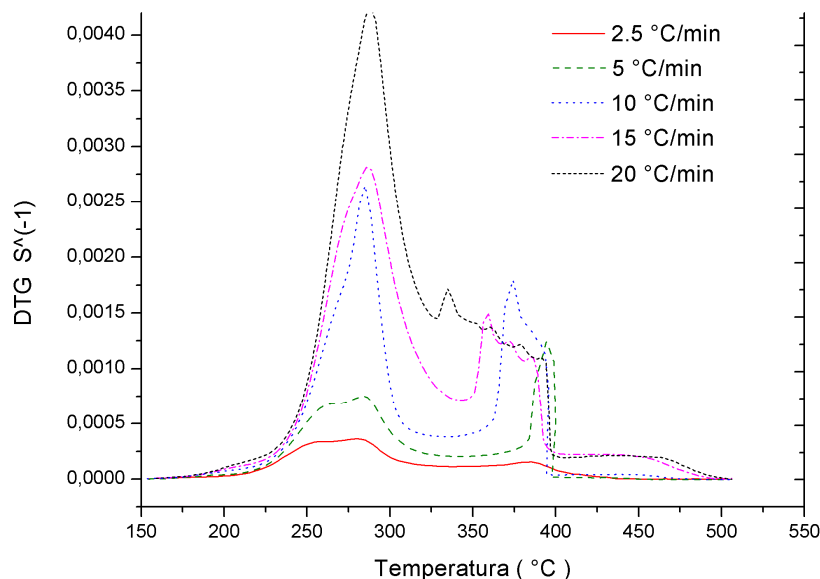
A partir de la Ecuación 12, si se representa  $\ln\left[\frac{-\ln(1-\alpha)}{T^2}\right]$  en el eje de ordenadas y  $\frac{1}{T(k)}$  en el eje de abscisas, se obtiene una recta. A partir de la pendiente de la recta, se obtiene energía de activación, mientras que a partir de la ordenada en el origen se obtiene el factor pre-exponencial, para el rango de temperatura que caracteriza el comportamiento del material durante el proceso térmico.

La combustión de la Guadua Angustifolia, se puede dividir en 3 zonas, primero una zona de evaporación de la humedad, desde la temperatura ambiente hasta aproximadamente 154 °C, posteriormente una zona en la que se produce fundamentalmente la desvolatilización y combustión de los volátiles, para este caso entre 154 °C a 315 °C aproximadamente y una última zona desde 315 °C hasta 333 °C en la que se produce fundamentalmente la combustión del char (carbono fijo), tal como se observa en la **Figura 4.4**. Para el estudio de la cinética de la combustión de la Guadua, solo se tendrán en cuenta las zonas de desvolatilización y combustión de volátiles y combustión de carbono fijo.



*Figura 4.7. TG y grado de conversión de combustión de la Guadua Angustifolia a 5 velocidades de calentamiento*

En la **Figura 4.7** se muestra las variaciones de la pérdida de masa (TGs) y los grados de conversión con la temperatura para las distintas velocidades de calentamiento.



*Figura 4.8. Curva DTG de la combustión de la Guadua Angustifolia Kunth a 5 velocidades de calentamiento.*

En la **Figura 4.8** se muestra las curvas derivadas termogravimétricas (DTGs) de la combustión de la *Guadua Angustifolia* a distintas velocidades de calentamiento.

Mediante el método Coats–Redfern, los parámetros cinéticos se evalúan a una determinada velocidad de calentamiento [119]. Para la *Guadua Angustifolia*, se ha seleccionado la menor velocidad de calentamiento, 2,5 °C/min.

En la **Figura 4.9**, se muestra el perfil de combustión de la *Guadua* para la velocidad de 2,5 °C/min, poniéndose de manifiesto la división en las etapas anteriormente indicadas. Sin embargo, puesto que la velocidad de calentamiento es distinta de la de la **Figura 4.4** dichas etapas se producen en intervalos de temperatura distintos.

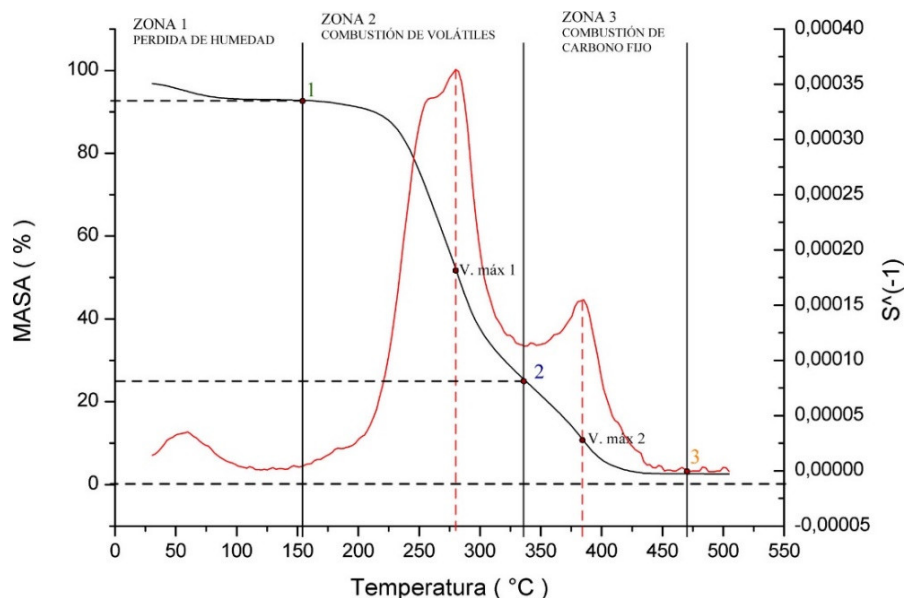


Figura 4.9. TG y DTG de la combustión de la Guadua Angustifolia a 2,5 °C/min

En la **Figura 4.9**, se evidencian claramente dos picos. En estos picos, las velocidades máximas de pérdida de peso se producen en los puntos V.máx 1 y V.máx 2 (**Figura 4.9**). El primero está fundamentalmente relacionado con la pérdida de volátiles, mientras que el segundo con la combustión del char (carbono fijo). En el punto 1 (154 °C), se inicia la etapa en la que predomina la desvolatilización y combustión de los volátiles, finalizando en el punto 2 (339 °C). En este punto se experimenta una pérdida del 75% de la masa de la Guadua Angustifolia incluyendo la humedad. Desde los 339 °C hasta los 468 °C, la etapa de transformación está dominada por la combustión del char. A partir de 468 °C, no se aprecia pérdida de masa, quedando un pequeño porcentaje de residuo inferior al 4%.

En la **Tabla 4.2**, se muestran parámetros cinéticos hallados para la combustión de la Guadua Angustifolia Kunth.

Tabla 4.2. Parámetros cinéticos de la combustión de la Guadua Angustifolia Kunth por el método Coats–Redfern

Rango de temperaturas °C	Energía de activación Ea kJ/mol	Factor pre-exponencial A (min <sup>-1</sup> )	Coefficiente de regresión lineal R <sup>2</sup>	Ecuación de la recta
154 - 339	88,93	3,90E+04	0,9832	$y = -10702x + 6,4778$
339 - 468	125,78	1,03E+06	0,9277	$y = -15136x + 9,7514$



Los valores de energía de activación para la zonas de desvolatilización-combustión de los volátiles y combustión del char de la Guadua Angustifolia son similares a los valores obtenidos por Wang y col. [120] en el estudio cinético de varios tipos de biomásas realizado también mediante el método de Coats–Redfern, tal como se observa en la Tabla 4.3.

*Tabla 4.3. Parámetros cinéticos de varios tipos de biomásas por el método Coats–Redfern (Adaptado de [120])*

BIOMASA	Rango de temperaturas °C	Energía de activación Ea kJ/mol	Factor pre-exponencial A (min <sup>-1</sup> )	Coefficiente de regresión lineal R <sup>2</sup>
Tallo de maíz	130-383	62,39	1,42E+05	0,9706
	383-555	124,02	2,36E+08	0,9444
Paja de arroz	142-390	62,200	3,49E+06	0,9686
	390-586	102,06	3,49E+06	0,9864
Cáscara de arroz	154-388	78,090	2,97E+06	0,9879
	388-586	98,610	2,19E+06	0,9811
Serrín de madera	150-400	75,070	1,08E+06	0,9859
	400-597	108,40	7,62E+06	0,9769

### Gases producto de la combustión de la Guadua Angustifolia Kunth

Las curvas TG y DTG de la combustión de la Guadua Angustifolia Kunth se llevaron a cabo con un analizador termogravimétrico Mettler-Toledo TGA / SDTA851e. Para determinar la evolución de los gases de combustión, se usó un espectrómetro de masas Pfeiffer Vacuum ThermoStar™ GSD301T. Se utilizaron muestras secas de alrededor de 15 mg con un tamaño de partícula < 200 µm. Al objeto de comprobar la reproducibilidad de los ensayos, se obtuvieron varios perfiles termogravimétricos, con un error relativo promedio en toda la curva de pérdida de peso menor del 1,0%. La combustión se llevó a cabo con un flujo de oxígeno de 50 cm<sup>3</sup> / min y una velocidad de calentamiento de 10 °C / min desde la temperatura ambiente hasta 800 °C. Este flujo de oxígeno garantiza una atmósfera oxidante en la muestra durante los ensayos, mientras que la velocidad de calentamiento lenta garantiza que las limitaciones en la transferencia de calor puedan ignorarse [74].

Los gases producidos en un proceso de combustión dependen del tipo de combustible empleado, de las condiciones de su combustión, y de las condiciones en las que se administra el aire que aporta el oxígeno para la reacción [122]. Una parte de estos gases están catalogados como contaminantes, dentro de los que se encuentran: las partículas, CO, HC, NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, gases ácidos y metales pesados que pueden proceder de los materiales tratados [100]. Debido a la producción de estos contaminantes durante el proceso de combustión y a la obligatoriedad de cumplir las leyes medioambientales, es necesario adoptar medidas para evitar al máximo su emisión a la atmósfera. Sin embargo, estos gases también pueden tener un aprovechamiento energético, puesto que pueden emplearse para el secado o la torrefacción de la materia bruta en aras de economizar energía y gas inerte [123]. En la **Tabla 4.4** se relacionan los gases productos de la combustión la Guadua Angustifolia.

*Tabla 4.4. Gases producto de la combustión de la Guadua Angustifolia Kunth.*

Nº	FÓRMULA QUÍMICA	COMPUESTO	INTENSIDAD máx. ( nA )
1	H <sub>2</sub> O	Agua	1,06
2	CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono	0,43
3	NO	Monóxido de nitrógeno	0,01960
4	HCl	Cloruro de hidrógeno	0,00540
5	Cl <sub>2</sub>	Cloro	0,00307
6	NO <sub>2</sub>	Dióxido de nitrógeno	0,00282
7	SO <sub>3</sub>	Trióxido de azufre	0,00051
8	CO	Monóxido de carbono	< 0,0005
9	SO <sub>2</sub>	Dióxido de azufre	< 0,0005

En la **Tabla 4.4**, además de los gases producto de la combustión de la Guadua Angustifolia, se indica la intensidad máxima de los picos asociados a su formación. En las **Figuras 4.10 y 4.11**, se muestran las curvas características para cada gas en el proceso de la combustión. Como puede observarse, todos los gases presentan su pico máximo de formación a 285 °C, que es la temperatura a la que se produce la máxima velocidad de pérdida de masa de la Guadua Angustifolia en el proceso de combustión. Los productos con mayor intensidad de formación son el H<sub>2</sub>O y CO<sub>2</sub>.

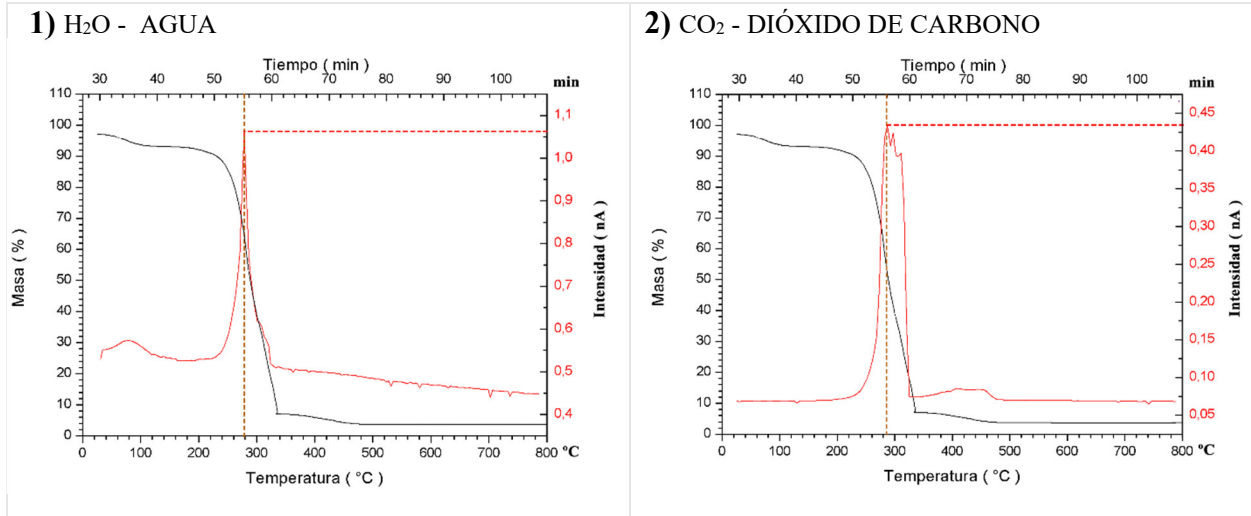
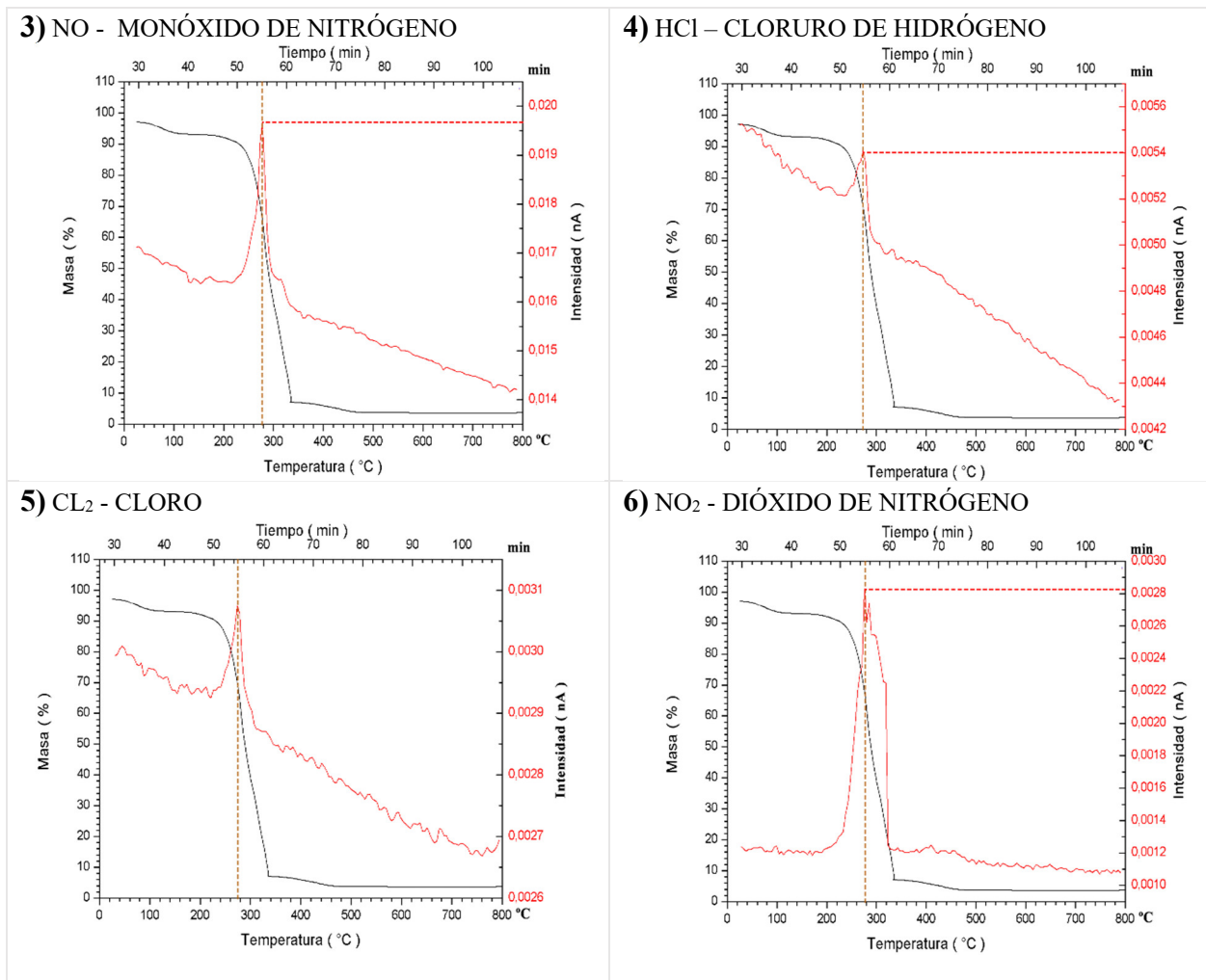
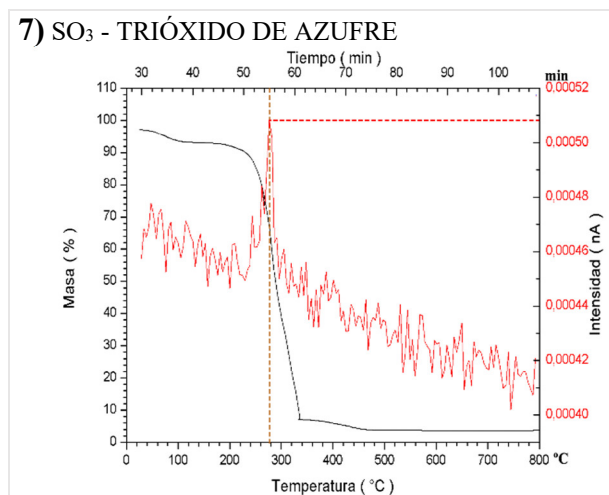


Figura 4.10. Gases producto de la combustión de la Guadua Angustifolia Kunth (1-2)





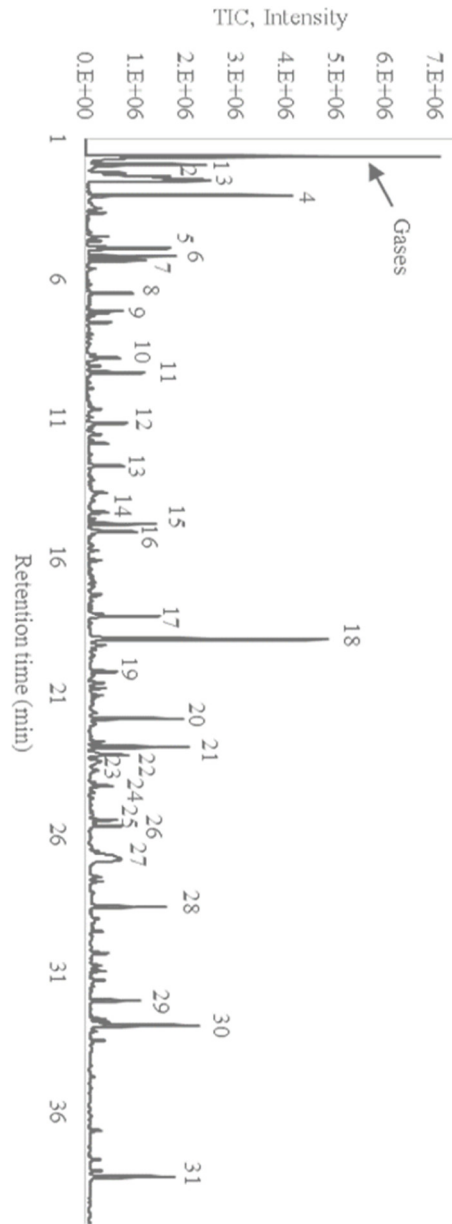
*Figura 4.11. Gases producto de la combustión de la *Guadua Angustifolia Kunth* (3-7)*

Aunque las intensidades son muy pequeñas, se observa la formación de productos con cloro y azufre, por lo que sería interesante efectuar una determinación cuantitativa de estos compuestos, dados los efectos perjudiciales de este tipo de productos en los equipos y materiales con los que entran en contacto [100].

Sin embargo, debe tenerse en cuenta que el bajo contenido de azufre obtenido para la *Guadua Angustifolia Kunth* (**Tabla 2.2**) sugiere que su combustión produciría muy bajos niveles de óxidos de azufre y, como el resto de biomásas, siempre menores que la combustión combustibles fósiles [101],[30].

## CAPÍTULO 5

### COMPOSICIÓN DEL COMBUSTIBLE LÍQUIDO OBTENIDO MEDIANTE PIRÓLISIS RÁPIDA DE LA GUADUA ANGUSTIFOLIA KUNTH



### **Pirólisis Rápida (Fast Pyrolysis)**

A partir de la pirólisis de la biomasa se pueden obtener productos líquidos, sólidos y gaseosos. Si el objetivo en la pirólisis de la biomasa es maximizar el rendimiento en líquido, se requerirá una moderada temperatura, alta velocidad de calentamiento y corto tiempo de residencia del gas [124],[72]. Así, una pirólisis rápida puede llegar a producir un rendimiento de líquido de hasta un 70% de la materia prima seca [125],[124]. Los aceites obtenidos a partir de la pirólisis rápida de la biomasa pueden ser candidatos para la sustitución de combustibles fósiles y emplearse en aplicaciones de motores, turbinas y calderas entre otros [41], [68], [126]. Sin embargo, estos bio-combustibles líquidos (bio-aceites) presentan el inconveniente de poseer una elevada concentración de compuestos oxigenados. La Guadua Angustifolia Kunth es un tipo de bambú, por lo que se trata de biomasa lignocelulósica que puede representar una alternativa para la generación de biocombustibles sin afectar por ello a la producción de alimentos [41]. En este capítulo se muestran los productos obtenidos a partir de la pirólisis rápida de la Guadua Angustifolia Kunth.

### **Ensayo de pirólisis rápida de la Guadua Angustifolia Kunth**

Las muestras de Guadua Angustifolia-Kunth procedentes de Colombia se trituraron a un tamaño inferior a 800  $\mu\text{m}$  y se caracterizaron mediante análisis elemental e inmediato, tal como se indicó en el Capítulo 2. Las muestras se sometieron a pirólisis rápida en atmósfera de helio a una temperatura de 500 °C durante 30 segundos. Los compuestos presentes en el bio-aceite obtenido a partir de la pirólisis se identificaron por cromatografía de gases - espectrometría de masas (Py-GC / MS). El análisis se realizó utilizando un pirolizador de doble disparo PY-2020iD de Frontier Laboratories acoplado a un GCMS-QP2010Plus de Shimadzu, equipado con una columna DB-5ms (0,25 mm i.d.; 30 m de longitud; 0,25  $\mu\text{m}$  de espesor de película). La

temperatura de la columna se mantuvo a 40 °C durante 2 minutos, luego se elevó a 300 °C a una velocidad de 5 °C / min y se mantuvo a esta temperatura durante 15 min. La espectrometría de masas (MS) se realizó en modo de exploración completa (43 - 600 m / z).

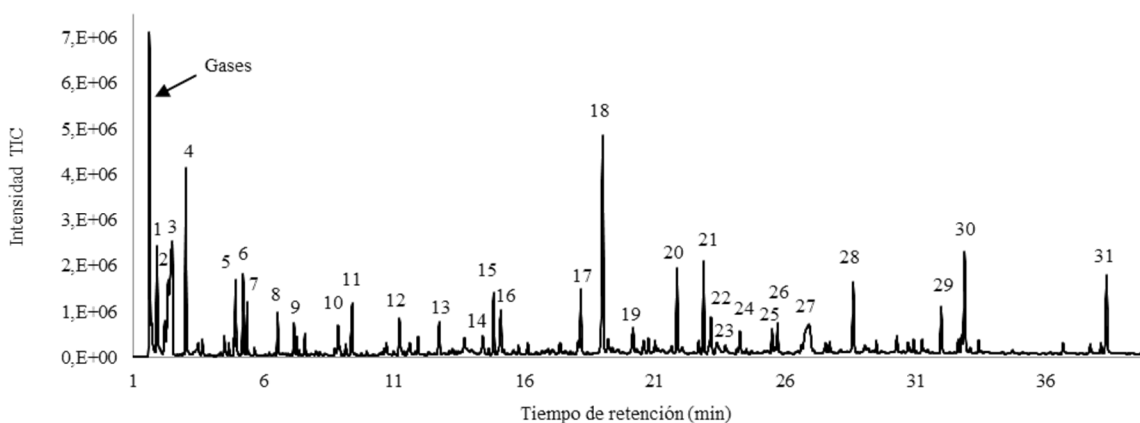
### Principales gases condensables obtenidos de la *Guadua Angustifolia* por pirólisis rápida

La **Tabla 5.1** muestra los compuestos más probables identificados por Py-GC / MS a partir de la *Guadua Angustifolia* -Kunth, así como un número de identificación del pico en el espectro con la intensidad absoluta (cuenta total de iones, TIC), el tiempo de retención (tr) y el área del pico correspondiente.

*Tabla 5.1. Gases Condensables de pirólisis rápida de la Guadua Angustifolia Kunth.*

NÚMERO DEL PICO	tr(min)	ÁREA PICO (%)	COMPUESTO	FÓRMULA MOLECULAR
3	2,517	10,08	Ácido acético	C2H4O2
18	19,013	8,17	2,3-Dihidrobenzofurano	C8H8O
4	3,022	4,25	Hidroxiacetona	C3H6O2
30	32,889	3,69	Alcohol coniferílico	C10H12O3
27	26,915	3,54	Levoglucosano	C6H10O5
1	1,917	3,33	Acetilformaldehído	C3H4O2
21	22,880	2,89	3,4-Dimetoxifenol	C8H10O3
31	38,331	2,74	Alcohol 2,5-dimetoxibencílico	C11H14O4
20	21,861	2,55	2-Metoxi-4-vinilfenol	C9H10O2
28	28,618	2,31	3,5-Dimetoxiacetofenona	C10H12O3
5	4,927	2,11	Ácido acetoxi acético	C4H6O4
17	18,169	2,09	2-Etoxifenol	C8H10O2
6	5,216	2,06	Succinaldehído	C4H6O2
11	9,400	1,83	Ciclopentano-1,2-diona	C5H6O2
15	14,828	1,73	2-Metoxifenol	C7H8O2
16	15,106	1,68	Ciclobutanol	C4H8O
29	31,989	1,46	4-Alil-2,6-dimetoxifenol	C11H14O3
22	23,168	1,36	3-Hidroxibenzaldehído	C7H6O2
12	11,215	1,29	Fenol	C6H6O
7	5,368	1,15	Anhídrido acético	C4H6O3
8	6,540	1,08	Furfural	C5H4O2
13	12,739	1,05	3-Metil-1,2-ciclopentanodiona	C6H8O2
2	2,212	1,02	Formiato de metilo	C2H4O2

19	20,163	0,92	4-Metilpirocatecol; 3-Metoxipirocatecol	C7H8O2;C7H8O3
10	8,860	0,9	2-Furanona	C4H4O2
26	25,714	0,86	Isoeugenol	C10H12O2
9	7,172	0,82	Alcohol furfúrico	C5H6O2
24	24,278	0,78	Vainillina	C8H8O3
23	23,385	0,77	Pirogalol; 1,2,4-Trihidroxibenceno	C6H6O3;C6H6O3
14	14,410	0,75	m-Cresol	C7H8O
25	25,505	0,73	1,2,4-Trimetoxibenceno	C9H12O3



*Figura 5.1. TIC obtenidas por Py-GC / MS de Guadua Angustifolia-Kunth*

Los 31 picos que se muestran en la **Figura 5.1** son aquellos cuyas áreas son superiores al 0,70% del área total y la suma total de las áreas de los picos representa el 70% de la materia volátil liberada durante la pirólisis rápida de *Guadua Angustifolia* Kunth. Según se refleja en la **Figura 5.1**, los compuestos más importantes del bio-aceite obtenido a partir de la pirólisis de *Guadua Angustifolia* son: el ácido acético (3), el 2,3-dihidrobenzofurano (18), la hidroxiacetona (4), el alcohol coniferílico (30), el levoglucosano (27) y el acetaldehído (1). Estos resultados se asemejan a los productos obtenidos por pirólisis rápida de madera de haya, realizados por Beaumont [127]. Sus resultados también ponen de manifiesto que el producto mayoritario del bio-aceite es el ácido acético. Los resultados de este capítulo, relativos a la composición del bio-aceite obtenido a partir de la pirólisis rápida de la *Guadua Angustifolia* Kunth, se publicaron en la revista *Energy Procedia* [41]. El artículo se recoge en el Anexo 1 de esta Tesis Doctoral.



La **Tabla 5.1** muestra que el bio-aceite contiene varios tipos de compuestos orgánicos oxigenados, que incluyen aldehídos, cetonas, ésteres, ácidos, alcoholes, compuestos orgánicos heterocíclicos, aromáticos y un azúcar anhidro (levoglucosano). Los puntos de ebullición de estos compuestos varían de 31,8 °C para formiato de metilo (2) a 384 °C para levoglucosano (27). La alta presencia de oxígeno en los bio-aceites es la principal diferencia entre ellos y los combustibles líquidos convencionales derivados del petróleo [67]. De los compuestos indicados en la **Tabla 5.1**, los aromáticos representan el 46,2%, la mayoría de ellos son fenólicos. Estos compuestos fenólicos provienen del craqueo térmico de la lignina, que es un polímero fenólico reticulado [128], cuya estructura fenólica se repite muchas veces en la molécula. Aunque se identificaron diferentes tipos de compuestos aromáticos en el bio-aceite, no se observaron hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP), debido probablemente al hecho de que la temperatura de pirólisis no fue lo suficientemente alta. Los HAP generalmente se forman a partir de una combustión incompleta o pirólisis de materia orgánica y tienen potenciales efectos carcinogénicos, mutagénicos y genotóxicos [129]. Generalmente se forman cuando las temperaturas superan los 700 °C [130]. Los compuestos asociados con los números de los picos 3, 6, 7, 8, 13, 15, 16, 20,24, 26 y 30 en la **Tabla 5.1**, también fueron encontrados por Gao y col. [131] después de la pirólisis del serrín de pino a 600 °C. A partir de ambos tipos de biomasa (serrín de pino y *Guadua*), se forma una alta proporción de ácido acético. Nsaful y col [132] también encontraron altos rendimientos de ácido acético de la pirólisis lenta de otro tipo de bambú (*Bambusa Balcoa*) a 600 °C en comparación con los de pino y dos residuos de maíz. El ácido acético proviene de la xilosa, un monosacárido de hemicelulosa, que se descompone en los grupos acetilo como resultado de la descomposición térmica [133]. Collard y col. han publicado que el ácido acético también proviene de la lignina y la pirólisis de celulosa, lo que explicaría el alto rendimiento de este compuesto. La presencia de este ácido

carboxílico es indeseable y hace que el bio-aceite sea potencialmente corrosivo [130]. 2,3-Dihidrobenzofurano es un benzofurano que se deriva de la holocelulosa, es decir, de los carbohidratos de Guadua que se encuentran en la celulosa y la hemicelulosa. La presencia de levoglucosano, se produce como consecuencia de la despolimerización de la celulosa [130], [134]. La proporción relativamente alta de este compuesto está relacionada con el corto tiempo de residencia, dado que este a su vez actúa como un intermediario en la formación de otros compuestos que son característicos de la descomposición de la celulosa. Algunos autores [134] han informado que su rendimiento depende de la fuente de celulosa y de las condiciones de pirólisis, produciéndose un aumento en el rendimiento con bajas temperaturas y/o altas tasas de calentamiento. La hidroxiacetona se produce principalmente a partir de la descomposición directa de celulosa y, en segundo lugar, de la del levoglucosano, mientras que el acetilformaldehído se produce principalmente por la descomposición secundaria del levoglucosano [134]. El alcohol coniferílico y otros compuestos, como la vainillina y el 2-metoxi-4-vinilfenol, se forman en la pirólisis primaria de la lignina, que se produce a temperaturas inferiores a 400 °C y en la que los grupos metoxi aromáticos son estables [135].

El levoglucosano, que es un azúcar anhidro producido por la despolimerización de los polisacáridos, se puede hidrolizar a glucosa para obtener bioetanol. También se puede utilizar en la síntesis de oligosacáridos o en la fabricación de productos farmacéuticos y otros materiales relacionados [136]. Vitasari y col. [137] estudiaron los aceites de pirólisis derivados de residuos forestales y derivados de pino que se produjeron mediante pirólisis rápida a 520 °C con un tiempo de residencia de 1 s cuyo contenido de levoglucosano fue de 1,7 y 1,6% en peso, respectivamente. En general, sin tratamiento previo de la materia prima, el aceite de pirólisis rápida contiene alrededor del 3% en peso de levoglucosano [138]. Gao y col. [131], después de la pirólisis del

serrín de pino a 600 °C, no encontraron levoglucosano en los 35 compuestos principales identificados en el bio-aceite. Por otro lado, Li y Zhang [136] publicaron la obtención de rendimientos máximos de levoglucosano de 19 y 37% en peso en el bio-aceite de pirólisis a 420 °C de residuos de periódicos y algodón que no había sido sometidos a un tratamiento previo. En el caso de los desechos de algodón, el alto rendimiento de levoglucosano puede estar asociado con el hecho de que este tipo de material tiene un contenido de celulosa muy alto, alrededor del 80% en peso [139]. Varios autores [140], [141] han señalado que, aplicando un tratamiento adecuado antes de la pirólisis rápida, se puede aumentar sustancialmente el rendimiento de levoglucosano. Johnson y col. [141] encontraron que las proporciones levoglucosano/ácido acético y levoglucosano/furfural en el bio-aceite obtenido de la pirólisis rápida de la paja de trigo aumentaron aproximadamente de 1 a 18 y de 7 a 28, respectivamente, cuando la temperatura de pretratamiento de la paja de trigo con agua caliente se incrementó de 175 a 260 °C. Como el rendimiento del levoglucosano en la pirólisis rápida depende en gran medida de la materia prima, es interesante encontrar una adecuada que favorezca la formación de levoglucosano sin un tratamiento previo, ya que el tratamiento previo agrega complejidad y encarece el proceso global. A partir de la pirólisis rápida de *Guadua*, se obtuvieron proporciones relativamente altas de levoglucosano, siendo las proporciones levoglucosano/ácido acético y levoglucosano/furfural alrededor de 0,35 y 3,3, respectivamente. Sin embargo, Nsaful y col. [132] encontraron un rendimiento de levoglucosano mucho más bajo por pirólisis lenta hasta 600 °C de *Bambusa balcooa* (un tipo de bambú), en comparación con pino, mazorca de maíz y rastrojo de maíz, siendo estos 0,09, 2,1, 0,26 y 0,23 % en peso biomasa seca, respectivamente. Estos autores concluyeron que los rendimientos de levoglucosano aumentan con el contenido inicial de azúcares C6, razón por la cual el pino, la mazorca de maíz y el rastrojo de maíz producen rendimientos de

levoglucosano más altos que el bambú *Bambusa balcooa* [132]. Además, entre las cenizas de 86 variedades de biomasa, las cenizas de bambú tiene un contenido muy alto de  $K_2O$  (53,38% en peso), sólo superado por cáscaras y cáscaras de almendras (63,90 y 53,48% en peso, respectivamente), los valores medios para la biomasa natural son de 19,33 % en peso [142]. Esto está de acuerdo con el hecho de que la biomasa con un rápido crecimiento anual se enriquece en elementos alcalinos que extrae del suelo [142]. La ceniza de *Guadua* tiene un contenido de potasio muy alto [60], mucho más alto que el de la madera y el carbón, y los elementos alcalinos son catalizadores fuertes de reacciones de fragmentación de celulosa que dan lugar a la formación de hidroxil acetil aldehído, favoreciéndolos sobre las reacciones de despolimerización que conducen a la formación de levoglucosano [141]. A pesar de que *Guadua* tiene un alto contenido de potasio, su pirólisis rápida produce proporciones relativamente altas de levoglucosano. Sin embargo, debe señalarse que no solo la temperatura de pirolisis, sino también el tiempo de residencia, la materia mineral y su composición influyen en la composición del bio-aceite.

### **Aspectos generales del bio-aceite de la pirólisis de biomasa**

El bio-aceite procedente de la pirolisis de la biomasa es un líquido oscuro con una composición elemental muy similar a la biomasa de origen, con un poder calorífico superior del orden de 17 MJ/kg y una densidad en torno a  $1,2 \text{ kg/m}^3$  [72]. Sin embargo, el valor del poder calorífico del bio-aceite depende directamente del origen del biomasa, su composición, procesamiento y las condiciones en las que se realice las pirolisis [81]. Xiao y col. [143] efectuaron la pirólisis de muestras de bambú, reportando valores del poder calorífico del bio-aceite que variaron, dependiendo de la temperatura, desde 21411 kJ/kg para una pirólisis a 600 °C hasta 28153 kJ/kg, cuando la temperatura era de 400 °C. El instituto Tecnológico de Mumbai-India, en estudios de caracterización de otro tipo de bambú, publicaron que el poder calorífico del bio-aceite obtenido

mediante pirólisis a 500 °C es de 22500 kJ/kg [144]. De lo anterior se deduce que es factible un proceso de conversión de Guadua Angustifolia Kunth en bio-aceite, a partir de su pirólisis rápida, para generación de electricidad con motores diésel. Bridgwater [68], reportó pruebas exitosas en las que se utilizó bio-aceite como combustible para motores diésel y se observó que su comportamiento, en términos de parámetros de funcionamiento y emisiones, era similar al combustible diésel convencional.

La pirolisis como tratamiento ofrece una amplia gama posibilidades para el aprovechamiento energético de la biomasa. Si bien la pirólisis rápida favorece la producción de la fracción líquida, una pirólisis lenta favorecerá la producción de combustible sólido [51]. El bambú *D. Giganteus* Munro, de características muy similares al bambú Guadua Angustifolia, ha sido caracterizado por pirólisis lenta a 500 °C, obteniéndose un residuo carbonoso con un con un 81,5% de carbono fijo y un poder calorífico de 30,8 MJ/kg [71].

De lo anterior se puede deducir que la Guadua Angustifolia Kunth, ofrece una alternativa real como materia prima en la generación de energía para comunidades rurales en Colombia. El aspecto clave que determinará su uso extendido como recurso energético está en la adaptación de tecnologías que por su economía viabilicen su utilización. En el Capítulo 7, se muestra un desarrollo para la utilización de Guadua Angustifolia Kunth como combustible, con un reactor de bajo coste que permite emplear este material con alto grado de aprovechamiento energético.

**CAPÍTULO 6**  
**GASIFICACIÓN DE BIOMASA LIGNOCELULÓSICA “GUADUA ANGUSTIFOLIA**  
**KUNTH”**



### **Biomasa Lignocelulósica**

*"La biomasa es aquella materia orgánica de origen vegetal o animal, incluyendo los residuos y desechos orgánicos, susceptible de ser aprovechada energéticamente. Las plantas transforman la energía radiante del sol en energía química a través de la fotosíntesis, y parte de esta energía queda almacenada en forma de materia orgánica" [145].*

#### **Clasificación de la biomasa según hidratos de carbono.**

Según la forma como podemos encontrar los hidratos de carbono, los cuales son el compuesto más abundante de la biomasa forestal, la biomasa se puede clasificar en:[146]

***Biomasa lignocelulósica:*** en la que predomina la celulosa, hemicelulosa y lignina

***Biomasa amilácea:*** predominan los polisacáridos de reservas tales como almidón o inulina

***Biomasa azucarada:*** Constituido por azúcares, como la glucosa o sacarosa.

***Biomasa oleaginosa:*** contiene un alto contenido en lípidos.

Un tipo de biomasa lignocelulosa es la Guadua Angustifolia Kunth. Según análisis realizados para este trabajo (**Tabla 2.3**), esta biomasa está compuesta por un 46.9% de Celulosa, un 17.6% de hemicelulosa y un 24.6% de lignina.

La Guadua Angustifolia presenta gran disponibilidad en territorio colombiano, este bambú se estudia en esta Tesis con el objetivo de evaluar sus posibilidades como recurso energético, en aras de viabilizar una ruta para la utilización de este tipo de biomasa como materia prima en la producción de energía térmica o electricidad por medio de procesos de gasificación, para comunidades rurales de Colombia. Para poder emplear la Guadua Angustifolia de manera eficiente como combustible, se necesita también el desarrollo y construcción de reactores de bajo costo que puedan ser adquiridos o construidos por las mismas comunidades. Solo de esta manera se podría asegurar que un combustible caracterizado con un buen potencial energético y de gran

disponibilidad en los territorios, pueda llegar a ofrecer una solución real a la problemática energética de comunidades rurales de Colombia.

### **Proceso de Gasificación**

Desde la aplicación para biomasa, la gasificación es el proceso mediante el cual la biomasa sólida es transformada termoquímicamente en una mezcla de gases condensables, no condensables, cenizas y pequeña cantidades de residuos carbonosos.

Este proceso se realiza para obtener un gas combustible que pueda ser usado de forma más versátil en equipos para generación de energía térmica o electricidad o para obtención de otros productos químicos [147].

Para que ocurra la gasificación se tiene que aportar la energía necesaria para romper los enlaces que constituyen la estructura de la biomasa y propiciar la formación de nuevos compuestos generalmente gaseosos.

El aporte de energía al proceso, lo da la combustión de una parte del material que se pretende gasificar, esto en presencia de un agente gasificante, normalmente se utiliza aire por su conveniencia económica, aunque también pueden emplearse vapor de agua, oxígeno. Con la utilización de estos últimos gasificantes se aumenta la calidad energética del gas resultante, pero se elevan los costos y la complejidad del reactor.

Gran parte de la energía aportada por la combustión es almacenada químicamente en las reacciones endotérmicas que dan origen a los gases que se utilizarán luego como combustible [51].

De un proceso de gasificación de biomasa se obtienen normalmente los siguientes gases: CO, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> y vapor de agua. Su concentración va depender del tipo de biomasa, el agente gasificante utilizado y las condiciones del reactor de gasificación [148].



En la gasificación de biomasa, ocurren una serie de reacciones tales como el secado, la pirólisis, la combustión y la reducción.

La etapa del secado se da desde la temperatura ambiente hasta aproximadamente los 200 °C, es aquí donde se evapora el contenido de humedad de la biomasa y parte de volátiles ligeros.

En la etapa de pirólisis, la biomasa por acción térmica y ausencia de oxígeno se descompone liberando monóxido de carbono, hidrógeno, dióxido de carbono, gases de hidrocarburos, alquitranes y carbón sólido [149].

La etapa de la combustión presenta dos momentos; uno cuando el proceso inicia, donde se oxidan el carbón y el hidrógeno de la biomasa produciendo  $\text{CO}_2$  y vapor de agua. Ya que esta reacción es altamente exotérmica, crea las condiciones para la etapa de reducción, la pirólisis y secado. Luego el segundo momento se da cuando producto de la pirólisis queda la biomasa sólida carbonizada, que al entrar en contacto con el oxígeno del aire se oxida formando  $\text{CO}_2$ , en adelante el proceso de combustión se mantendrá con la oxidación de parte del carbono resultante de la etapa de la pirólisis y otras reacciones exotérmicas que se dan paralelamente en la etapa de reducción o gasificación donde las altas temperaturas y la ausencia de oxígeno dan lugar a la recombinación de los elementos hacia la formación principalmente de monóxido e hidrógeno [51], [148].

### Reacciones típicas de la gasificación

La **Tabla 6. 1** resume las reacciones típicas de la gasificación de biomasa en condiciones estándar, en ella se describe el tipo, representación química de la reacción y su entalpía estándar de reacción.

*Tabla 6. 1. Reacciones típicas de la gasificación de biomasa. Fuente: Modificada de Basu 2010 [51].*

TIPO DE REACCIÓN	REACCIÓN	REFERENCIA
<b>Reacciones del Carbono</b>		
R 1 (Boudouard)	$C + CO_2 \leftrightarrow 2CO + 172 \text{ kJ/mol}$	[150]
R 2 (agua-gas )	$C + H_2O \leftrightarrow CO + H_2 + 131 \text{ kJ/mol}$	[151]
R3 (hidrogasificación)	$C + 2H_2 \leftrightarrow CH_4 - 74,8 \text{ kJ/mol}$	[151]
R 4	$C + 0,5O_2 \rightarrow CO - 111 \text{ kJ/mol}$	[150]
<b>Reacciones de Oxidación</b>		
R 5	$C + O_2 \rightarrow CO_2 - 394 \text{ kJ/mol}$	[151]
R 6	$CO + 0,5O_2 \rightarrow CO_2 - 284 \text{ kJ/mol}$	[152]
R 7	$CH_4 + 2O_2 \leftrightarrow CO_2 + 2 H_2O - 803 \text{ kJ/mol}$	[150]
R 8	$H_2 + 0,5 O_2 \rightarrow H_2O - 242 \text{ kJ/mol}$	[152]
<b>Reacción de Intercambio</b>		
R 9	$CO + H_2O \leftrightarrow CO_2 + H_2 - 41,2 \text{ kJ/mol}$	[152]
<b>Reacciones de Metanación</b>		
R 10	$2CO + 2 H_2 \rightarrow CH_4 + CO_2 - 247 \text{ kJ/mol}$	[152]
R 11	$CO + 3 H_2 \leftrightarrow CH_4 + H_2O - 206 \text{ kJ/mol}$	[152]
R 14	$CO_2 + 4 H_2 \rightarrow CH_4 + 2 H_2O - 165 \text{ kJ/mol}$	[151]
<b>Reacciones Reformado de Vapor</b>		
R 12	$CH_4 + H_2O \leftrightarrow CO + 3 H_2 + 206 \text{ kJ/mol}$	[150]
R 13	$CH_4 + 0,5 O_2 \rightarrow CO + 2 H_2 - 36 \text{ kJ/mol}$	[150]

Las reacciones tienen diferentes velocidades por lo tanto se pueden sobreponer en las etapas del proceso de gasificación, esto da lugar a recombinaciones de los productos resultantes de cada etapa. De las reacciones R1 a R4, la más rápida es la R4, en esta reacción el oxígeno se consume tan rápido que prácticamente no queda oxígeno libre para otras reacciones [51].

Como lo muestra la **Tabla 6. 1**, las reacciones heterogéneas entre el carbono - CO<sub>2</sub> (Boudouard) y carbono - vapor de agua (agua-gas) son endotérmicas, la reacción de gasificación con vapor de agua es de 3 a 5 veces más rápida que la gasificación con CO<sub>2</sub> [153].

En conclusión, las reacciones más rápidas son las del carbono oxígeno, seguido por las del carbono vapor de agua, luego las de carbono CO<sub>2</sub> y por último la reacción más lenta es la formación del metano [51].

En el proceso de gasificación las reacciones más importantes son las que conllevan la formación final del mayor porcentaje posible monóxido de carbono e hidrógeno, ya que de esto depende el grado de poder calorífico del gas resultante.

### **Agentes Gasificantes**

En un proceso de gasificación de biomasa el agente gasificante es un gas o mezcla de gases que interactúan con la materia prima a gasificar para propiciar las reacciones y condiciones que darán lugar a la formación del gas combustible.

Los principales agentes gasificantes son: Aire, vapor de agua y oxígeno.

El tipo de agente gasificante determinará en gran parte la composición de los gases producto de la gasificación, pero son muchos los factores que influyen en este resultado, el tipo de materia prima, las condiciones de gasificación entre otras[148].El tipo de agente gasificante tendrá influencia en el poder calorífico del gas obtenido, en la formación de alquitrán, aunque es muy difícil predecir eficazmente la calidad de productos por la gran variabilidad de parámetros con que se lleva a cabo el proceso de gasificación [154].

No obstante existen algunos puntos coincidentes que generalizan el comportamiento de los diferentes agentes gasificantes, como se detalla en la **Tabla 6. 2**.

Tabla 6. 2. Principales Agentes Gasificantes.

AGENTE GASIFICANTE	PCI MJ/m <sup>3</sup>	VENTAJAS	DESVENTAJAS	REFERENCIA
Aire	4-7			[51]
		La gasificación con aire se usa ampliamente en comparación con el oxígeno y el vapor debido a su ventaja económica y operativa.	-Gas con poco poder calorífico, -Alto contenido de Nitrógeno	[155]
Vapor de Agua	10-18			[51]
		Aumenta el porcentaje de hidrogeno y CO en el gas resultante. Por ende mayor poder calorífico.	La gasificación con vapor necesita una fuente externa de calor	[156]
Oxigeno	12-28			[51]
		El gas producto puede utilizarse como gas de síntesis para la obtención de metanol.	Altos costos	[157]
			Problemas para controlar la reacción dada la alta reactividad del oxigeno	[158]

### Etapas generales de un sistema básico para gasificación de biomasa

Un sistema básico de gasificación para biomasa está formado por: la etapa del reactor de gasificación, la etapa de acondicionamiento de la calidad del gas y la etapa de aspiración o impulsión de los gases. (Figura 6.1).

***Etapas reactor de gasificación:*** en este se da lugar a la entrada de biomasa, entrada de agente gasificante, la ignición y las consecutivas reacciones que dan origen a la transformación termoquímica de la biomasa en el gas combustible.

***Etapas de acondicionamiento de la calidad del gas:*** En esta etapa se realiza una limpieza del gas, se remueven partículas sólidas, se enfría el gas y filtra, esto con el fin de mejorar la calidad del gas a ser usado en diferentes dispositivos, normalmente motores de combustión o turbinas para la generación de electricidad. Esta etapa la constituyen: El ciclón, el intercambiador de calor y el filtro. (Figura 6.1).

En sistemas de gasificación para combustión directa no es necesario el tratamiento del gas ya que partículas y alquitranes simplemente se queman [159].

**Sistema para aspiración o impulsión del gases:** Es necesario un sistema para garantizar el ingreso del agente gasificante al reactor y el transporte del gas producido hasta la zona donde este se entregue para su aplicación definitiva, según el modelo del gasificador esta acción se puede realizar inyectando el gasificante por su puerto entrada, o instalado un sistema de aspiración normalmente a la salida del sistema de filtrado. (Figura 6.1).

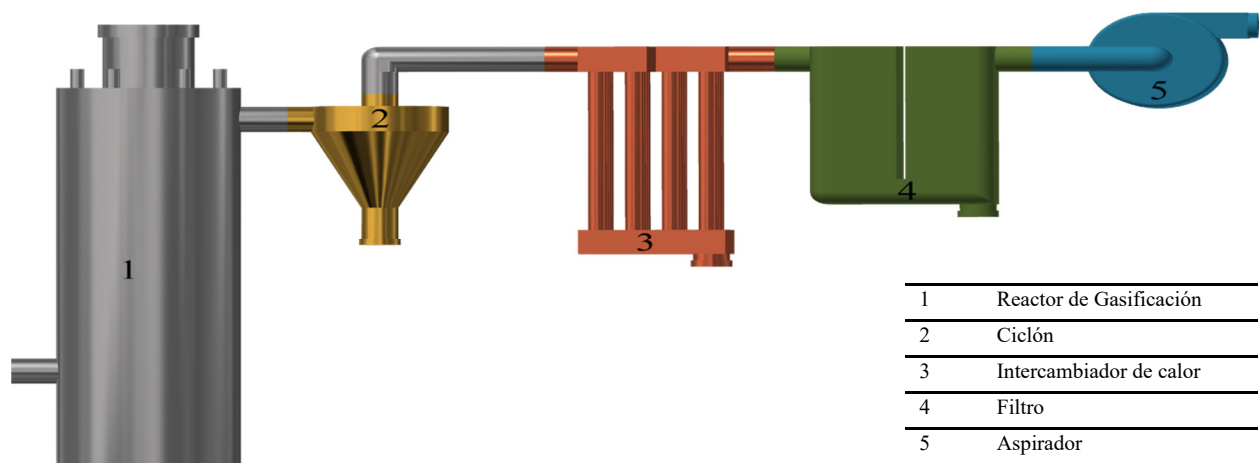


Figura 6.1. Partes principales de un sistema básico de gasificación de biomasa.

Cuando el sistema de gasificación se utiliza para la generación de electricidad por medio de un generador eléctrico con motor de combustión, el mismo motor una vez en marcha crea las condiciones de aspiración del gas combustible [51], por lo tanto el sistema inicial de impulsión o aspiración solo se requeriría para el arranque del motor.

Adicionalmente se debe incluir una antorcha para monitorear el arranque del sistema de gasificación, ya que la generación de llama alertará de la presencia de gas combustible, este proceso de encendido de llama puede tardar bastante tiempo, (dependiendo el modelo de gasificador, la humedad de la materia prima entre otros) y con regularidad la llama tenderá

a apagarse, siendo necesario su constante reencendido con un soplete u otro sistema de ignición, mientras el reactor logra sus temperaturas y condiciones óptimas de funcionamiento. Ante cualquier eventualidad, la antorcha permitirá quemar el gas y evitar la emisión del monóxido de carbono o sobrepresiones del reactor.

### **Gasificación en Corriente Ascendente y Descendente.**

Según el Laboratorio Nacional de Tecnología Energética (NETL), del Departamento de Energía de los Estados Unidos, existen tres clasificaciones principales de gasificadores en las que se encuentran la mayoría de los gasificadores disponibles comercialmente; Gasificadores de lecho fijo, Gasificadores de flujo arrastrado y Gasificadores de lecho fluidizado.[160]

De los tipos de gasificadores existentes, para uso práctico de esta Tesis solo se hace mención a los gasificadores de lecho fijo en corriente descendente y en corriente ascendente, pues son los modelos que por su sencillez de fabricación y utilización se ajustan a la propuesta de aprovechamiento energético de la Guadua Angustifolia Kunth para comunidades rurales de Colombia según el objetivo marcado para esta tesis.

#### ***Gasificador básico en corriente descendente.***

De las diferentes tecnologías que utilizan biomasa para generación de energía, la gasificación se considera la opción más adecuada, ya que es un proceso simple y económicamente viable para producir energía térmica o generación de electricidad de forma descentralizada [161].

Existen principalmente dos diseños para gasificadores de tiro descendente: el gasificador Imbert y el de tiro descendente estratificado también llamado de tapa abierta o núcleo abierto (open top, open core) [162]. El modelo Imbert debe su nombre a su inventor, Georges Imbert 1920. Es el modelo de gasificador de tiro o corriente descendente más popularizado, este modelo

fue utilizado masivamente en la segunda guerra mundial [51], [148], y aun en la actualidad fabricantes de gasificadores basan su construcción en los fundamentos de operación de este tipo de gasificador [163], también en varios trabajos investigativos han empleado este tipo de gasificador para conocer el comportamiento de diferentes materiales en el proceso de gasificación.

Los principios de funcionamiento del modelo de gasificador de estratificado o de tapa abierta o núcleo abierto, fueron propuestos y desarrollados en los años 80 por esfuerzos cooperativos de investigadores del Instituto de Investigación de Energía Solar de Golden Colorado, Estados Unidos, la Universidad de California en Davis, la Universidad abierta en Londres, la Compañía Buck Rogers en Kansas y la Biomasa Energy Foundation Inc, en Florida. [148], [164]-[166]. El modelo de gasificador en corriente descendente tapa abierta o núcleo abierto busca mejorar las limitaciones que presenta el modelo Imbert. Estudios posteriores a los años 80, aportaron más datos del comportamiento de este tipo de gasificador [167]-[170]. Modificaciones a los modelos originales incluyeron entrada de aire secundario, este tipo también fue estudiado y probado por varios autores [171]-[174]. Esta modificación mejoró la conversión del carbón y disminuyó la cantidad de alquitrán.

El gasificador Imbert es un reactor cilíndrico con un estrechamiento o garganta en la parte inferior. El agente gasificante se inyecta justo por encima de la garganta, creando la zona de combustión, los gases y alquitranes son obligados a pasar por esta zona de altas temperaturas, lo que permite el craqueo parcial de los alquitranes formados [175]. El gas resultante contendrá una baja concentración de partículas y alquitranes (aproximadamente  $1 \text{ g/Nm}^3$ ), lo que lo hace ideal cuando se desea un gas limpio.[176]. Una de las desventajas de este modelo es la relativa baja eficiencia térmica general y dificultades en el manejo de biomasa con alto contenido de

humedad y cenizas [149]. Para el correcto funcionamiento de un reactor de corriente descendente tipo Imbert, se recomienda un pretratamiento de la biomasa para eliminar buena parte de la humedad, lo mismo que la disminución de la partículas de la biomasa hasta un tamaño no superior a 6 cm [161],[32]. Aunque el manejo de diferentes tamaño de partículas dependerá también del tamaño del hogar de combustión generalmente hasta un 10% del diámetro sería recomendable, la partículas más grandes pueden formar puentes e impedir que la biomasa se mueva hacia abajo, y partículas muy finas tienden a formar tapones que dificultan el paso del aire lo que conlleva al apagado del gasificador [157].

El gasificador estratificado de corriente descendente o de tapa abierta, no tiene ninguna constricción y tanto la materia prima y el agente de gasificante ingresan por la parte superior del gasificador [162],[175]. El aire y la biomasa fluyen simultáneamente hacia abajo. En La parte superior del reactor, parte de la biomasa puede precalentarse y secarse. Bajo esta región se encuentra la zona de "pirólisis llameante" [148] es decir, la descomposición térmica de la biomasa y la combustión de productos volátiles en un suministro inadecuado de oxígeno. La tercera zona consiste en un lecho de carbón caliente donde se producen reacciones de agrietamiento y gasificación. Finalmente, el carbón inerte constituye la cuarta zona, donde las temperaturas suelen ser demasiado bajas para que las reacciones sean activas. Sirve como amortiguador, en el caso de que la zona de pirólisis en llamas se mueva cerca de la rejilla, y como filtro de partículas [174].

Los gasificadores de corriente descendente de tapa abierta son muy sencillos de fabricar y pueden ser diseñados para manejar bajas potencias y procesar diferentes tipos y tamaños de biomasa. Con un adecuado sistema de limpieza de gases, se consigue un combustible óptimo para trabajar con pequeñas plantas generadoras de electricidad. Razón que hace este modelo muy



importante para llevar una solución de suministro eléctrico a comunidades alejadas de sitios urbanos o donde no se disponga de electricidad.

### **Partes de un gasificador básico en corriente descendente tipo tapa abierta (Figura 6.2)**

Parte1. Carga de biomasa y entrada de agente gasificante (Aire): este modelo permite realizar la carga del material por la parte superior del gasificador y de igual forma por esta zona ingresar el aire, el cual deberá ser aspirado desde la salida del reactor. Por las altas temperaturas de los gases de salida, la aspiración del aire se debería realizar desde la etapa final de enfriamiento y filtrado.

Parte2. Salida de gas producto: el gas sale a muy altas temperaturas y con pequeñas partículas sólidas arrastradas por la corriente de los gases, en este punto se deberá acoplar el Ciclón, para que realice la separación de la mayor parte de dichas partículas. A la salida del ciclón se conectarán las etapas de enfriamiento y filtrado para garantizar que el gas producto tenga unas condiciones óptimas y pueda ser utilizado con motores generadores, sin causar daños a sus sistemas. Según IDAE 2007, para el correcto funcionamiento del motor la temperatura de rocío de los alquitranes debe ser inferior a 50°C [14].

Parte3. Zona de secado: en esta parte del gasificador la biomasa va perdiendo su humedad por acción de la conducción térmica, el vapor aquí producido es arrastrado junto con los gases de las etapas inmediatamente inferiores, y cuando encuentra las condiciones térmicas adecuadas reacciona formando diferentes compuestos, entre los más importantes monóxido de carbono e hidrógeno, esto ocurre cuando el vapor reacciona con el carbono a altas temperaturas, aunque por las diferentes velocidades de las reacciones, el vapor de agua puede combinarse, con monóxido de carbono para formar dióxido de carbono e hidrogeno y lo mismo que el hidrogeno reaccionar

con el carbono para formar metano, las ecuaciones de estas reacciones las describe Zainal y col. [177] y se resumen en la **Tabla 6. 1**.

La cantidad de biomasa que procesa el gasificador disminuye con el aumento de la humedad, [178], en un gasificador en corriente descendente el aumento de la humedad, también aumenta la cantidad de hidrógeno, el dióxido de carbono y levemente el metano, pero el monóxido de carbono disminuye lo mismo que la temperatura del reactor [179].

Parte4. Zona de pirólisis en llamas (flaming pyrolysis): En esta zona la biomasa reacciona con el aire produciendo una pirólisis en llamas (flaming pyrolysis), los volátiles productos de la pirólisis de la biomasa se queman, produciendo un residuo carbonoso [180].

Parte5. Zona de reducción o gasificación : En esta zona compuesta por el residuo carbonoso de la zona de pirólisis anterior [51], las altas temperaturas y la ausencia de oxígeno dan lugar a la recombinación de los elementos hacia la formación principalmente de monóxido e hidrógeno [51], [148].

Parte6. Zona de carbón inerte : En esta zona, las temperaturas suelen ser demasiado bajas para que se produzcan reacciones con los residuos carbonosos que no reaccionaron en las etapas anteriores, pero sirve como amortiguador en el caso de que la zona de pirólisis en llamas se mueva cerca de la rejilla, y como filtro de partículas [174].

Parte7. Zona de cenizas: en este lugar caerán y se almacenarán las cenizas del proceso, para su fácil remoción se instalará un puerto con tapa, garantizando siempre la hermeticidad del reactor.

Parte8. Puerto de ignición: desde este punto se aportará la energía para encender el reactor, un soplete a gas puede facilitar este proceso de encendido. Una vez en marcha el reactor, este puerto se cierra y permanecerá así durante el tiempo que se trabaje el gasificador. El tiempo de arranque

de un gasificador de corriente descendente puede estar en un rango de 20 a 30 minutos [181], [182], este tiempo puede aumentar si se presenta exceso de humedad, ocasionando una generación de gases que no queman, ni accionarían un motor de combustión interna, por el contrario estarían emitiendo gases contaminantes. El tiempo de arranque de un gasificador se puede disminuir utilizando una biomasa seca o en lo posible carbón vegetal en la zona de combustión. Otra técnica muy práctica para estos pequeños gasificadores consiste en realizar el encendido con una pequeña cantidad de biomasa seca o carbón vegetal y una vez alcanzada una buena masa de material incandescente ir agregando biomasa poco a poco hasta la llenar el reactor. Disminuir al máximo el punto de arranque de los gasificadores es un tema para seguir investigando y mejorar las condiciones de manejabilidad de esta tecnología.



*Figura 6.2. Modelo básico de gasificador en corriente descendente tapa abierta. Abajo, vista interior del gasificador con sus partes y arriba, vista orientativa del exterior del gasificador.*

### ***Gasificación en corriente ascendente.***

Este puede ser el modelo más básico para gasificar biomasa, está compuesto por un cuerpo generalmente cilíndrico donde la biomasa es quemada parcialmente en la parte inferior y los gases calientes de la combustión atraviesan todo el cuerpo de biomasa ingresada, dando lugar a las diferentes etapas del proceso de gasificación, (secado, pirólisis y reducción). Este modelo es recomendado para combustión directa, ya que produce un alto porcentaje de alquitranes debido al enfriamiento que sufre el gas al atravesar la biomasa [183], [184] un alto contenido de vapor de agua también saldrá con los gases[149].

El gasificador en corriente ascendente no es recomendable para ser usado con motores de combustión dado su alto porcentaje de alquitranes, ya que causará daños a los cilindros y pistones[185], aunque gasificando materias primas con bajos volátiles (carbones) y etapas de limpieza los gases podrían ser utilizados para tal fin. [148]

Las principales ventajas de los gasificadores en corriente ascendente o en contracorriente son: su fácil construcción, capacidad de gasificar biombras con alto contenido de humedad, y su alta eficiencia térmica; el calor de los gases producidos es recuperado por la biomasa entrante, este intercambio logra secar la biomasa.[186].

### **Partes de un gasificador en corriente ascendente**

A continuación se detallan las partes principales de un gasificador básico en corriente ascendente. (**Figura 6.3**).

Parte1, Carga de biomasa y salida del gas producto: la carga del material se hace por la parte superior del reactor, por esta misma zona podrán salir los gases de la gasificación, según el

diseño del reactor y la utilización que se le quiera dar al gas, en este punto los gases pueden ser quemados.

Parte2, Zona de secado: Los gases calientes provenientes de las zonas inferiores en este punto van secando la biomasa que ingresa al reactor, el vapor aquí liberado sale con la corriente de gases.

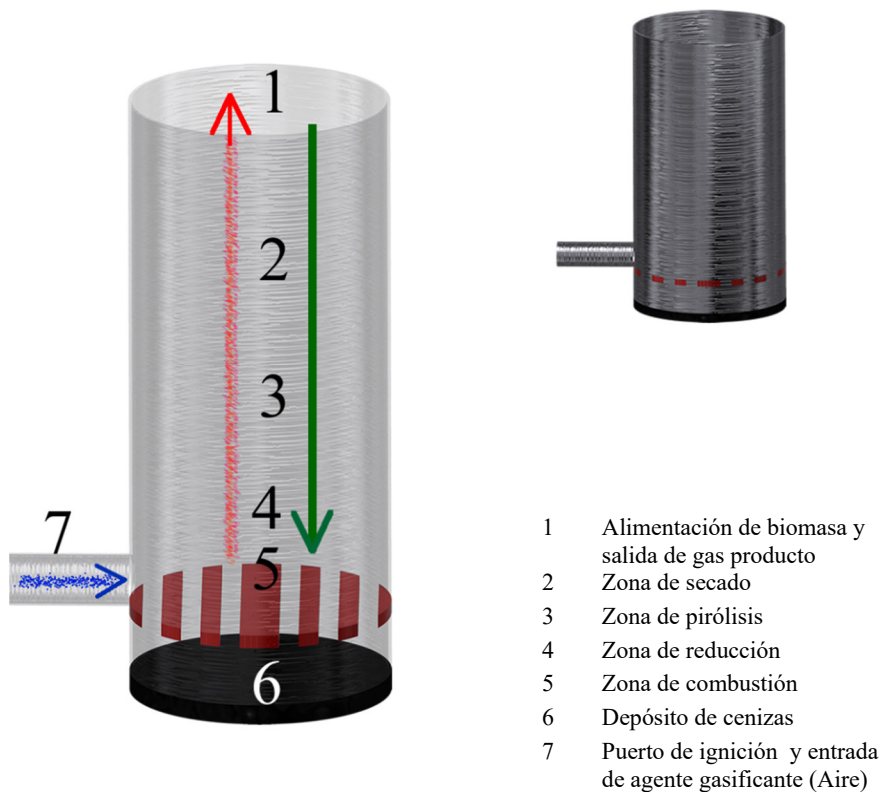
Parte3, Zona de pirólisis : las reacciones exotérmicas de la etapa de combustión transfieren la energía por conducción de la masa ardiente y por los gases calientes allí generados, esto provoca que la biomasa en esta zona se descomponga térmicamente en ausencia de oxígeno, generando los gases condensables, no condensables y un residuo carbonoso [51], [187], los gases de la pirólisis en el gasificador de corriente ascendente salen junto con los gases producidos en las etapas inferiores.[51]

Parte4, Zona de reducción o gasificación: en el gasificador de corriente ascendente la altas temperaturas de la zona de combustión y la escasez de oxígeno, la presencia de carbono incandescente, monóxido y dióxido de carbono y agua, crean las condiciones para la formación de hidrógeno, monóxido de carbono y metano, como gases combustible del proceso de gasificación, estos gases son arrastrados, hacia arriba donde se combinaran con los gases liberados en la zona de la pirólisis [148]

Parte5, Zona de combustión: en esta zona se quema parte de la biomasa para generar las temperaturas que dan origen a los procesos de las etapas de reducción, pirólisis y secado del material. En un arranque normal en la zona de combustión inicialmente se quema biomasa, luego de iniciado el proceso, se oxidará el residuo carbonoso originado en la zona de pirólisis.

Parte6, Zona de cenizas: en este modelo de gasificador, dado que la corriente de aire se aporta por la parte inferior, la remoción de cenizas no requiere un completo hermetizado del reactor, facilitando con esto implementar sistemas sencillos para remoción de cenizas, aun cuando el gasificador esté en funcionamiento.

Parte7, Puerto de Ignición y Entrada de Agente Gasificante (Aire): por este punto se realizará el encendido del reactor, un soplete a gas puede facilitar este proceso, de igual forma por este puerto ingresará el aire a la zona de combustión. Cuando el gas se pretende quemar directamente, el ingreso del aire se puede realizar por inyección desde este punto. Cuando se quiere tratar el gas, se puede utilizar también la aspiración normalmente desde salida del filtro final del sistema de gasificación. (**Figura 6.1**).



*Figura 6.3. Modelo básico de gasificador en corriente ascendente, abajo vista interior del gasificador con sus partes y arriba vista orientativa del exterior del gasificador.*

### **Gasificación de Guadua Angustifolia Kunth en corriente ascendente y descendente**

El poder calorífico del gas producto de la gasificación de biomasa, está relacionado con la composición del material, el contenido de humedad, el tipo de agente gasificante, y las condiciones con que se realice la gasificación.

Las investigaciones que se han realizado para la gasificación de biomasa lignocelulósicas, han concluido que este tipo de biomasa es apropiada para esta tecnología, sin embargo biomasa especiales como el bambú requieren que los gasificadores sean diseñados para las cualidades específicas de este material [34]. Trabajos sobre la gasificación de la Guadua y otros tipos de bambúes, con reactores convencionales han mostrado resultados en cuanto a la composición de los gases no concordantes con la mayoría estudios de gasificación, esto debido a problemas técnicos en la mediciones, o diseño de reactores no ajustados a este material [34], [188].

Para esta Tesis se probaron varias tipologías de gasificadores de lecho fijo, en corriente ascendente y en corriente descendente, para validar los tamaños de partículas de Guadua Angustifolia adecuados y los tiempos de encendido, notando que tanto en corriente ascendente o descendente la Guadua Angustifolia en forma de serrín (partículas inferiores a 2 milímetros), generaba atascamientos en el reactor, dificultando el desarrollo de la gasificación. Una solución al manejo de serrín para gasificación podría estar en peletizar este material, pero hay que tener en cuenta que la peletización requiere de maquinaria especial y un consumo energético de aproximadamente 70 kWe/h/ton [189],[190]. Para el caso de la Guadua se tendría que determinar el gasto energético exacto de su peletizado, porque este consumo depende de las propiedades de las materias primas, sobre todo en su composición química [190]. Los 70kWe/h/ton de consumo energético por peletizado citados anteriormente, coinciden también los valores de aportados por la empresa Americana “Meelko” [191] y la empresa colombiana “MaquinPRO” [192],

fabricantes de máquinas peletizadoras para el mercado colombiano. Bajo la anterior consideración optamos por utilizar pedazos pequeños de Guadua con medidas aproximadas de 2cm a 5cm x 1cm x 1cm. Una técnica sencilla para obtener esta granulometría de la Guadua Angustifolia, se expone en el capítulo 7, página 128.

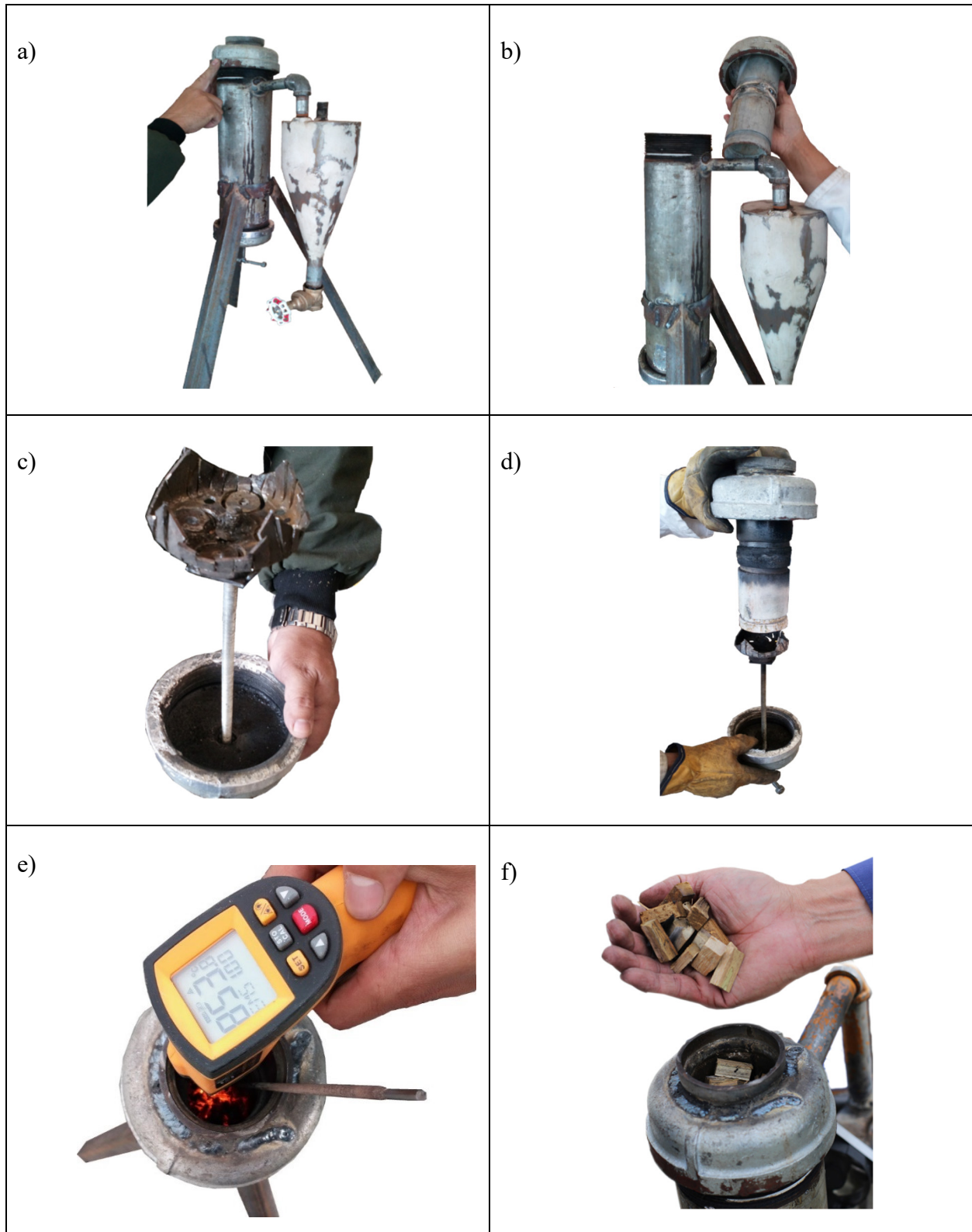
### **Gasificador para Guadua Angustifolia en corriente descendente sin tapa (tapa abierta o núcleo abierto).**

Los principios de funcionamiento del modelo de gasificador estratificado o de tapa abierta o núcleo abierto, fueron propuestos y desarrollados en los años 80 por esfuerzos cooperativos de investigadores del Instituto de Investigación de Energía Solar de Golden Colorado, Estados Unidos, la Universidad de California en Davis, la Universidad abierta en Londres, la Compañía Buck Rogers en Kansas y la “Biomass Energy Foundation Inc”, en Florida [148], [164]-[166].

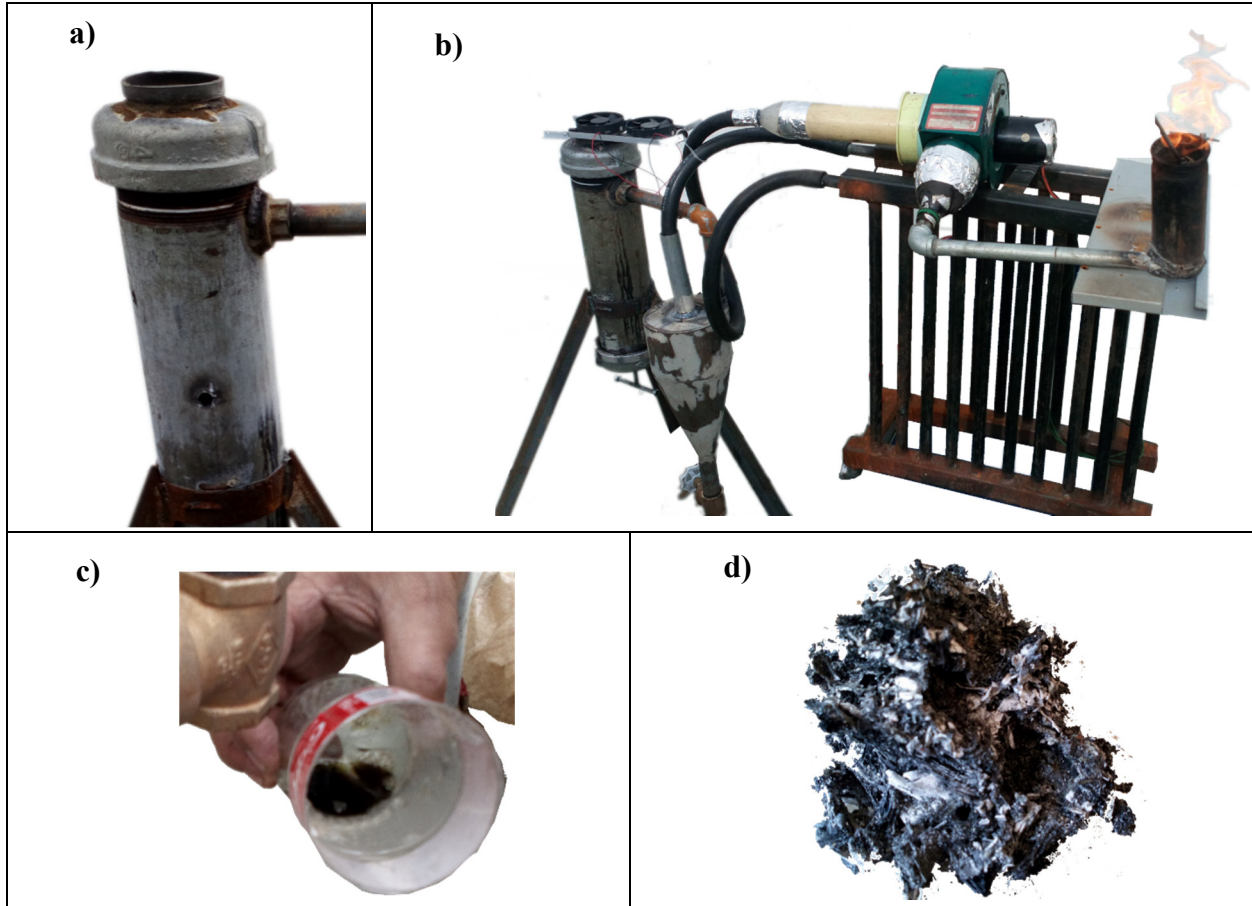
Según lo reporta Sadhan Mahapatra [187], el “Indian Institute of Science (IISc), Bangalore” desarrolló una versión de gasificador de tapa abierta, destacado por su calidad superior en la producción de gas, y por estar dentro de los reactores más eficientes reportados en la literatura para este tipo de gasificador [187]. Este modelo sido utilizado en varias investigaciones por Dasappa y col. [193] y Sadhan Mahapatra [187].

Realizamos mejoras constructivas a los modelos originales con el ánimo de simplificar su construcción y reducir costos de fabricación. Como resultado de este diseño se obtuvo el prototipo mostrado en **Figura 6.4** y **Figura 6.5**. En este tipo de gasificador la biomasa y una parte del aire ingresan por la parte superior del gasificador, la otra parte del aire ingresa directamente a la zona de combustión por un puerto lateral, (**Figura 6.5, a**) el cual también se utilizará como puerto de ignición. El encendido se realizará con una pequeña cantidad de material y luego de elevar las temperaturas del reactor, se irá agregando la Guadua a Gasificar.





**Figura 6.4.** Gasificador en corriente descendente sin tapa para *Guadua Angustifolia*  
a) Reactor con ciclón, b) Reactor con porta biomasa, c) Parrilla giratoria, d) Porta biomasa y parrilla  
e) Temperatura encendido f) Alimentación de material



*Figura 6.5. Productos gasificación corriente descendente sin Tapa para Guadua Angustifolia  
a) Vista puerto lateral, b) Reactor quemando el gas, c) Residuo alquitrán, d) Cenizas de gasificación.*

El arreglo de figuras anteriores ambienta todo el proceso desde el armado y puesta en marcha del prototipo de gasificador corriente descendente sin tapa superior, el tiempo promedio de encendido fue de 12 minutos, a partir de ahí el gas obtenido mantuvo su llama hasta el minuto 55, aunque por condiciones de ráfagas de viento del lugar donde realizamos la prueba, en varias ocasiones se perdía la llama, y era necesario acercarle un soplete de gas o un mechero para volver a encenderla. La práctica se realizaba con 500 gramos de Guadua Angustifolia, esto por limitaciones dimensionales del reactor. Luego de los 55 minutos (promedio de las pruebas), que se apagaba la llama y se evidenciaba que el material se había consumido, se apagaba la aireación y se permitía que el reactor se enfriara. Como residuo final se recogieron 22 gramos de cenizas (promedio) y 1,8 cm<sup>3</sup> de líquido de alquitrán.

Las pruebas demostraron que este tipo de reactor puede ser utilizado para gasificar Guadua Angustifolia Kunth, y obtener un gas combustible que puede ser usado para quemar o para generación de electricidad con pequeños moto-generadores, aunque la práctica de generación de electricidad no se realizó, el hecho que el gas quemara en la antorcha de forma continua, y la poca cantidad de alquitrán producido da un indicio de su viabilidad.

La práctica cumplió con el objetivo, se construyó un gasificador de rápido encendido y se obtuvo un gas combustible a partir de la gasificación de la Guadua Angustifolia Kunth, lo que prueba también que la Guadua puede ser utilizada para la generación de energía térmica o electricidad por medio de este tipo de reactores de bajo costo.

Por cálculos con precios de materiales en Colombia, se estimó que un reactor de este tipo para Gasificar 5kg de Guadua Angustifolia por lote, podría valer menos de 300 Euros.

Una desventaja analizada a este modelo, es su limitada autonomía, ya que para la remoción de cenizas se hace necesario que el reactor este apagado. Para encontrar una solución nos planteamos aumentar el depósito de cenizas, modificamos el reactor y realizamos las pruebas, como se observa en la **Figura 6.6. Los resultados no fueron satisfactorios**, pues concluimos que al cambiar las dimensiones, la zona de Reducción pierde temperatura y no se logra las condiciones para formación del gas combustible de manera adecuada, sumado a que el reactor no contaba con aislamiento térmico, las perdidas aumentaron en proporción. Se necesitó 70 minutos para lograr que el gas hiciera llama, de igual forma la llama formada no se mantuvo encendida más de 20 segundos, aun trabajando en un espacio cerrado sin interferencia de viento. Una solución para trabajo continuo se expone en el capítulo 8 donde se muestra el diseño de un modelo para gasificar biomasa Guadua Angustifolia, el cual permite gasificar en corriente ascendente o descendente, cargar biomasa, y descargar cenizas en pleno funcionamiento.



*Figura 6.6. Prueba fallida, reactor con depósito grande para cenizas. Prototipo no funcional.*

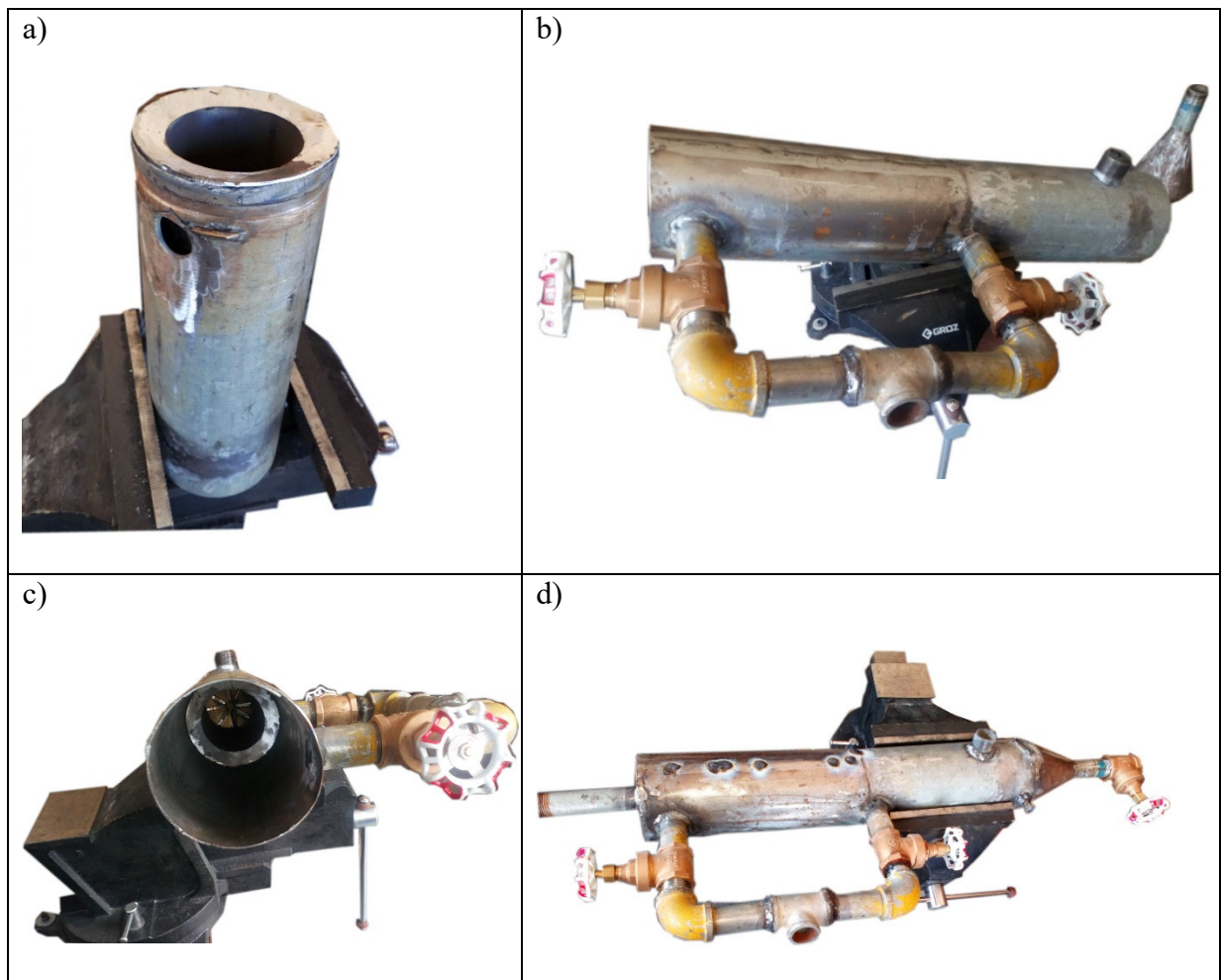
### **Gasificador para Guadua Angustifolia en Corriente Ascendente**

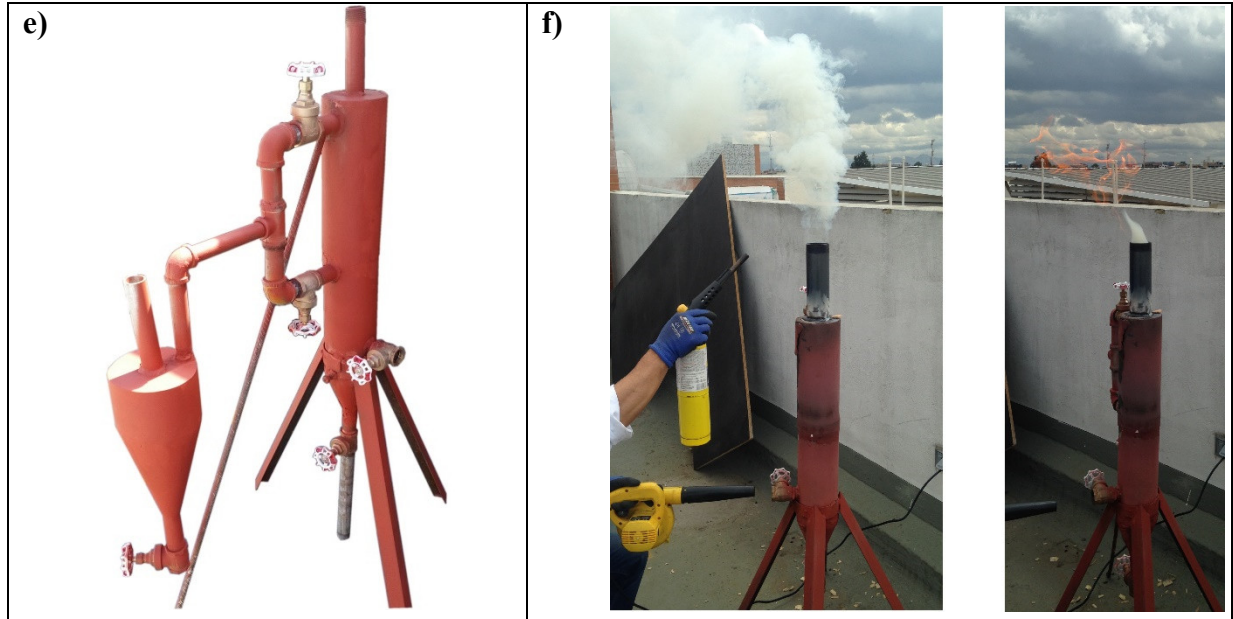
Para esta práctica se construyó el modelo de reactor planteado en el capítulo 8, y se configuró para trabajar en corriente ascendente con una carga de 1000 gramos de Guadua Angustifolia, este modelo tubo un tiempo de encendido de 20 minutos, momento en el cual el gas prendió. La llama se mantuvo encendida por 15 minutos, el residuo de cenizas promedio fue de 36 gramos, los alquitranes no fueron medidos puesto que el gas se quemaba en forma directa. El tiempo de encendido fue superior comparado con el modelo de corriente descendente, esto debido a su gran masa térmica según lo reportan Basu, Reed y Das [51], [148].

Este modelo de gasificador puede ser utilizado para combustión directa con biomasa Guadua Angustifolia, ya que por las características del reactor podrían manejar, diferentes tamaños de partículas y un rango más elevado de humedad en el material [152], hasta un máximo del 50% de humedad según lo reportan Pereira y col [194]. En investigación de Anca y col [195], se

modeló el comportamiento de este tipo de reactores con una humedad de 45%, notando un bajo contenido de hidrogeno en el gas resultante. De igual forma, Yu y Smith [196], demostraron que el aumento de humedad de la biomasa en gasificadores corriente ascendente disminuye el contenido de hidrogeno y a su vez el poder calorífico del gas producto. Por los anteriores motivos aunque podamos trabajar la Guadua Angustifolia con altos contenido de humedad, es recomendable utilizar una técnica pasiva para disminuir el máximo posible su humedad.

Las **Figura 6.7** (a-f), ilustran el proceso de construcción y puesta en marcha del reactor en corriente ascendente para la práctica con Guadua Angustifolia.





*Figura 6.7. Gasificador en corriente ascendente para guadua angustifolia, construcción y prueba de combustión. a) Porta biomasa, b) Llaves selectoras, c) Vista zona de combustión, d) Cuerpo general del reactor, e) Reactor con ciclón, f) Reactor quemando el gas.*

Esta práctica nos permitió validar la sencillez de operación del modelo corriente ascendente, y determinar puntos a mejorar. Fruto del aprendizaje con la construcción y operación de este tipo de reactor, se diseñó el Gasificador en corriente ascendente para combustión directa el cual se expone en el capítulo 7. Esta es una versión totalmente mejorada, donde se destaca, la capacidad de trabajar de forma continua, ya que se le adaptó un sistema de remoción de cenizas y una dosificación individual de aire de gasificación y aire de combustión, lo que permite regular la potencia del reactor, este modelo de reactor se diseñó para el manejo especial de biomasa Guadua Angustifolia.

### **Estimación de la composición de los gases de gasificación de la Guadua Angustifolia y su poder calorífico inferior**

Para la determinación de los gases productos de la gasificación de la Guadua Angustifolia se utilizó un método predictivo basado en correlaciones aplicadas a modelos de equilibrio termodinámico y datos experimentales aportados por diferentes autores para gasificación de

biomasas lignocelulósicas y otros tipos de bambúes. El método de predicción por correlaciones utilizado fue el de Pradhan y col. [197], donde a partir del análisis elemental de la biomasa se puede estimar la composición porcentual de los principales gases producto de la gasificación. (H<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N). En el desarrollo de este método predictivo, Pradhan y col. [197], probaron varios estudios con modelos de equilibrio termodinámico y datos experimentales para la predicción de la composición de gases de la gasificación. Una vez hallado el modelo con mejor concordancia a los valores experimentales, se empleó el análisis de superficie de respuesta para predecir los parámetros, como la temperatura del reactor, humedad del material [197]. Fueron realizadas simulaciones con 50 especies de biomasas lignocelulósicas incluidas bambú. Obteniendo las correlaciones que permiten realizar una estimación rápida de los gases producto de la gasificación. Las siguientes son las correlaciones utilizadas para la predicción de gases producto de la gasificación de la Guadua Angustifolia Kunth.

*Tabla 6.3. Correlaciones para estimación de gases productos de gasificación de biomasa en corriente descendente y con aire como agente gasificante. Fuente: Adaptado de Pradhan y col [197].*

<b>Correlaciones para estimación de gases productos de gasificación de biomasa</b>	
%H <sub>2</sub>	= -31,329 + (0,386 × %C) + (1,889 × %H) + (0,522 × %O) + (0,33 × %N)
%CO	= -35,141 + (0,854 × %C) - (0,852 × %H) + (0,514 × %O) + (0,304 × %N)
%CO <sub>2</sub>	= 36,467 - (0,443 × %C) - (0,65 × %H) - (0,025 × %O) - (0,186 × %N)
%CH <sub>4</sub>	= -0,579 + (0,006 × %C) + (0,027 × %H) + (0,007 × %O)
%N	= 130,582 - (0,803 × %C) - (0,414 × %H) - (1,019 × %O) - (0,45 X %N)

Según el análisis elemental de la Guadua Angustifolia Kunth, los elementos principales que esta biomasa contiene son: 47,92% de Carbono, 6,68% de Hidrógeno, 40,49% de Oxígeno y 0,45% de Nitrógeno. Reemplazando estos porcentajes en las correlaciones de la **Tabla 6.3**, tenemos que la composición de los gases de gasificación del bambú Guadua Angustifolia Kunth

estaría representado por un 21,07% de Hidrogeno, 21,03 de Monóxido de Carbono, 9,8 de dióxido de carbono, 0,17% de Metano y 47,8% de Nitrógeno. A partir de estos valores se estima el poder calorífico del gas producto. Para este cálculo se utilizó la formulación de Basu 2010 [51] y utilizada por Pradhan y col. [197].

$$LHV_{gas} = 10,78_{x1} \times 12,63_{x2} \times 35,88_{x5} \quad [51] \quad (13)$$

De la expresión (13),  $x_1$ ,  $x_2$  y  $x_5$  corresponden las fracciones de hidrógeno, monóxido de carbono y metano respectivamente, como gases combustibles estimados anteriormente para la Guadua, por lo tanto el poder calorífico inferior para los gases de la gasificación de la Guadua Angustifolia en corriente descendente y con aire como gasificante, sería aproximadamente de 4.9 MJ/Nm<sup>3</sup>

En la **Tabla 6. 4**, se comparan los valores estimados para la Guadua Angustifolia, con valores experimentales y medidos de la gasificación de otros tipos de bambúes y otras biomásas lignocelulósicas.

*Tabla 6. 4. Tabla comparativa de la composición de gases de gasificación de la Guadua y diferentes biomásas*

REFERENCIA	[33]	[34], [35]	[198]	[32]	
BIOMASA	Bambú Guadua Angustifolia	Bambú Tulda	Bambú Vulgaris Vitata	Pellet de serrín de madera	Madera de Caucho
<b>Humedad (%)</b>	7.8	10	13.42	9.5	14.7
<b>C (%db)</b>	47.92	48.39	45.90	47.88	50.6
<b>H (%db)</b>	6.68	5.86	5.81	5.68	6.5
<b>O (%db)</b>	40.49	39.21	43.1	44.16	42
<b>N (%db)</b>	0.45	2.04	NR	0.18	0.2
<b>CENIZAS (%)</b>	3.8	4.5	5.14	2.1	0.7
<b>H<sub>2</sub> (%)</b>	21.07	18	20	17.5	17.2
<b>CO (%)</b>	21.03	20.2	16.49	21.3	19.4
<b>CO<sub>2</sub> (%)</b>	9.8	10.5	12.24	13.3	9.7
<b>CH<sub>4</sub> (%)</b>	0.17	1.15	0.0015	3.1	1.1
<b>N<sub>2</sub> (%)</b>	47.8	48	41.53	44.2	52.6
<b>PCI (MJ/Nm<sup>3</sup>)</b>	4.9 (*)	NR(*) 4.86	4.28	6	NR(*)4.65

NR. No Reportado, (\*) estimado por correlaciones de la **Tabla 6.3** [197]



Para el bambú con aire como agente gasificante se determinó una temperatura óptima de gasificación de 700°C y una ER (relación estequiométrica) de 0,4 para obtener un PCI de 6,22 MJ/Nm<sup>3</sup> [199]. En la India la empresa GP Green Energy Systems, gasificando bambú en corriente ascendente obtiene 5,25 MJ/Nm<sup>3</sup> – 5,65 MJ/Nm<sup>3</sup> [200], por otra parte el Instituto de Tecnología de Mumbai, determinó un poder calorífico de 4,25 MJ/Nm<sup>3</sup> para gasificación de bambú en reactor de corriente descendente, y una relación de conversión de biomasa a gas de 2,33 (15 kg/h por 35 m<sup>3</sup>/h) [144], este valor de conversión de biomasa a gas por gasificación coincide con los valores dados por la empresa Americana “All Power labs” [201], empresa con amplia experiencia a nivel mundial en el diseño y construcción de reactores de gasificación los cuales reportan como regla de general la siguiente relación:

“1 kg of biomass  $\cong$  2 lbs biomass  $\cong$  2 m<sup>3</sup> woodgas  $\cong$  1 HP-hour  $\cong$  0,75 kWh electrical” [202]

De la información anterior concluimos que la Guadua Angustifolia Kunth al ser una biomasa lignocelulósica de composición elemental muy similar al resto de biomásas de este tipo; cuando es sometida al proceso térmico de gasificación, generará una mezcla de gases con concentraciones y poder calorífico muy similares a los obtenidos con las demás biomásas mencionadas. No existe un valor único de composición de gases de gasificación para la Guadua Angustifolia y las demás biomásas, ya que el tipo de gas obtenido y su poder calorífico depende no solo de su composición elemental, sino de otros factores como el agente gasificante y las condiciones del reactor de gasificación [144]. Adicionalmente la utilización de catalizadores que pueden mejorar la calidad y concentración de los gases obtenidos del proceso de gasificación. Una de estas técnicas es la adición de óxido de calcio a la biomasa para lograr adsorción del gas carbónico de la mezcla de los gases [203]. De esta manera el gas resultante contendrá mayor porcentaje de gases combustibles y a su vez reducirá la emisión de CO<sub>2</sub> a la atmósfera.

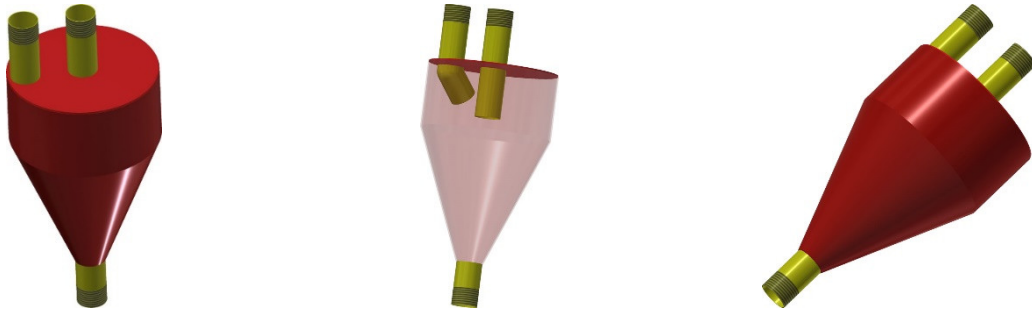
### **Componentes adicionales para un sistema de gasificación de Guadua Angustifolia.**

Cálculos precisos se requieren para el correcto diseño de los equipos auxiliares de un sistema de gasificación, ya que estos dependerán del tipo de gas a tratar, su temperatura, su velocidad y su composición y los requerimientos de los equipos que utilizarán dicho gas. Nuestro aporte a este tema de componentes radica en su técnica constructiva, buscando simplificar su fabricación en aras de viabilizar su posible autoconstrucción o la reducción sustancial de precios en su adquisición.

### **Ciclón**

Se construyó un modelo de ciclón donde el gas ingresa por la parte superior, por intermedio de un codo a 45 grados, donde internamente el gas toma su orientación conveniente para favorecer el efecto de la formación de los vórtices. A pesar de su estructura simple, los separadores ciclónicos presentan dinámicas de fluidos y patrones de flujo extremadamente complejos.[204], Estudios han comprobado que el cambio de ángulo en la entrada del fluido al ciclón puede mejorar la eficiencia[204], [205], pruebas realizadas por Qian 2009 [206], con ángulo de entrada 45%, reportó mejoras sustanciales en el rendimiento del ciclón.

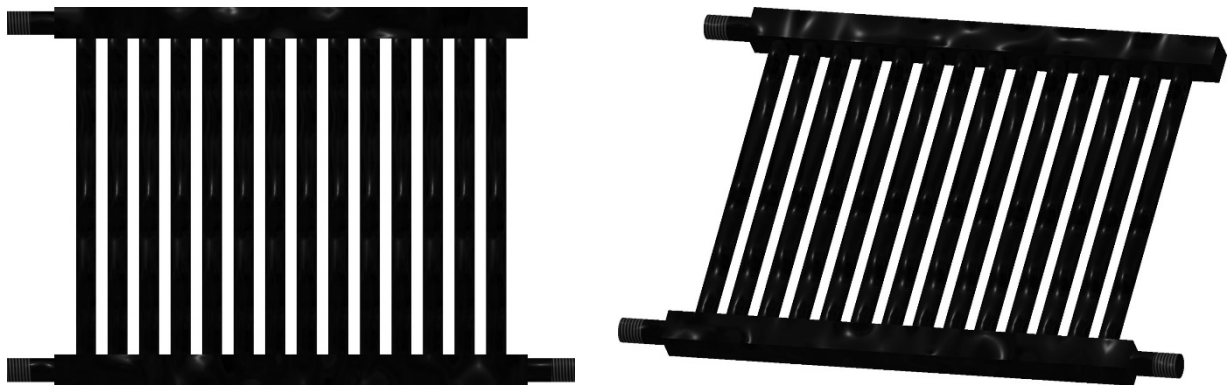
La fabricación del ciclón se facilita ya que realizar la perforación en la tapa plana superior, es más sencillo que realizar perforaciones y soldadura en superficies cilíndricas, adicionalmente permite utilizar tuberías y accesorios estándar lo que reduce los costos y tiempos de producción, lo anterior sin sacrificar la efectividad del elemento separador de partículas. Los gases que entran en contacto con el ciclón vienen a elevadas temperaturas por lo que se recomienda utilizar en fabricación láminas de acero con calibres para estas condiciones. Las **Figura 6.8** ilustran conceptualmente el modelo de ciclón diseñado, construido y utilizado en las pruebas de gasificación de Guadua con dos modelos de gasificador (ascendente y descendente tapa abierta).



*Figura 6.8. Modelo de ciclón con codo a 45 grados*

### **Sistema de enfriamiento**

Los gases salen del gasificador a muy altas temperaturas y deben ser enfriados para aumentar su densidad, condensar humedad y alquitranes. Cuando el gas va a ser usado en motores de combustión lo ideal es que el gas se enfríe a temperatura casi ambiente.[207]. El paso del gas por las superficies del gasificador, las tuberías y el ciclón, logra bajar en parte la temperatura, pero adicionalmente se necesita una superficie especial para enfriar el gas[148]. Un sencillo radiador fabricado con tubería galvanizada de bajo calibre, puede ser una solución económica para el enfriamiento de los gases de la gasificación, el modelo construido tiene tres puertos, para entrada, salida de gases y limpieza de alquitranes, este modelo se puede acoplar en varias unidades, tanto en paralelo como en serie, para aumentar la capacidad de enfriamiento o manejo de caudales mayores de gas.

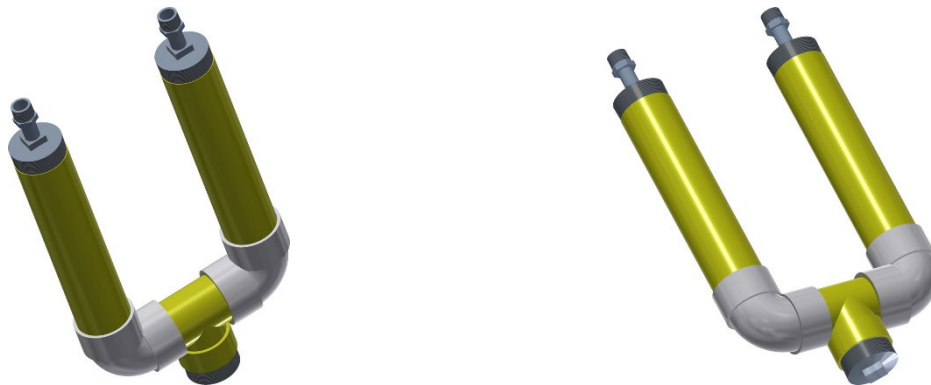


*Figura 6.9. Sistema de radiador para enfriamiento de gases.*

### Etapa de filtrado

Cuando el gas va a ser utilizado con motores de combustión, una etapa final de limpieza es necesaria para remover del gas pequeñas partículas y condensados, que a esta altura aún se encuentran. Generalmente en pequeños gasificadores se usa el serrín como material filtrante [208],[209] y telas para evitar que partículas del material filtrante sean arrastradas hacia el motor o dispositivo que empleará este gas [210]. Para reactores a escala industrial, o aplicaciones químicas del gas, existen sistemas más complejos. [211],[212]. Para nuestro trabajo recomendamos el uso del serrín de la Guadua o Madera junto a Carbón activado, que puede provenir de la misma materia prima. Este material filtrante será usado como combustibles en siguientes lotes de gasificación pues su actividad de retención de alquitranes lo convierte en un material catalogado como tóxico [213].

Se construyó el filtro con Tubos PVC, utilizando la variedad de accesorios que este producto dispone, logrando una configuración sencilla y práctica, con una entrada de gases, una salida de gases y una salida para condensables como lo ilustra la **Figura 6.10**.



*Figura 6.10. Modelo de filtro para gases producto de gasificación, fabricado con accesorios PVC*

Los diseños anteriormente descritos de ciclón, sistema de enfriamiento y filtro, fueron construidos y puestos en funcionamiento en las diferentes prácticas de gasificación realizadas para esta Tesis. (**Figura 6.11**).

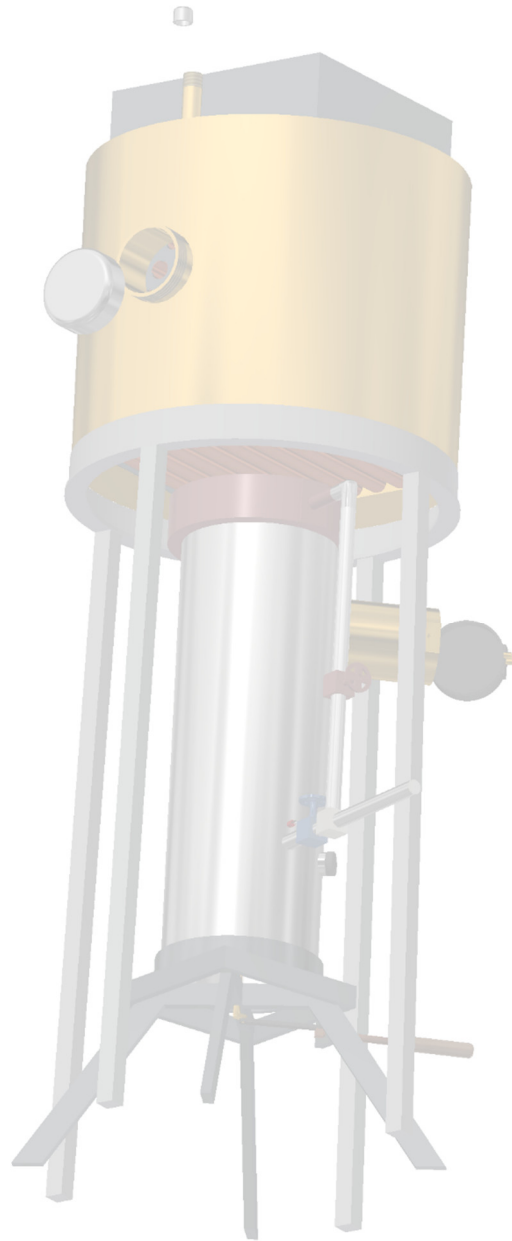


*Figura 6.11. Sistema de gasificación con elementos auxiliares.*

Para futuros proyectos de implementación de sistemas de gasificación es necesario un estricto cálculo para ajustar los modelos a condiciones óptimas en el manejo de las diferentes variables de la gasificación, lo mismo que la selección de materiales con propiedades adecuadas al trabajo a realizar, y un buen aislamiento térmico al reactor. Lo anterior con el ánimo de lograr una buena eficiencia global del sistema, pero teniendo en cuenta un balance económico razonable.

## CAPÍTULO 7

### DISEÑO DE UN REACTOR DE GASIFICACIÓN CORRIENTE ASCENDENTE PARA COMBUSTIÓN DIRECTA



### **Gasificador corriente ascendente para combustión directa**

En el proceso de gasificación se convierte un combustible sólido en un combustible gaseoso,[165], [214], [215]. Un combustible gaseoso quema mejor que un combustible sólido, puesto que la mezcla con el comburente se hace más eficiente [216]. A nivel industrial y para aprovechar instalaciones existentes de hornos de carbón, se ha utilizado la técnica de gasificar biomasa para luego realizar una quema conjunta con este combustible sólido. Esta técnica aporta flexibilidad al manejo del combustible [217]. En este enfoque la gasificación puede considerarse como una forma de preprocesamiento de la biomasa como combustible. [108].

La combustión de biomasa para la cocción de alimentos es una práctica ancestral que aun en la actualidad se continúa utilizando en comunidades rurales, incluso en pequeñas poblaciones [218]. En Colombia esta situación es también habitual, uno por la gran disponibilidad de residuo forestal y lo otro por la dificultad y altos costos que suponen el suministro de gas natural para comunidades alejadas de centros poblados. Para estas comunidades, la utilización de cilindros de gas propano, presenta la misma dificultad técnica y económica. Problemas de salud de tipo respiratorio están asociados a la utilización de leña para la cocción de alimentos, [219], [220]. Esto se debe a la gran generación de humos y micropartículas que producen las estufas tradicionales o fogones de leña [221]. La generación de estos productos perjudiciales se debe en gran parte a la incompleta combustión de la biomasa, dado que las estufas tradicionales según lo reportan Kandpal y Maheshwari [218], son extremadamente ineficientes con valores entre el 5 y 13% de aprovechamiento del poder del combustible. Como respuesta a esta problemática se han desarrollado modelos de estufas domésticas eficientes [218], algunas de estas aunque hayan mejorado la calidad de la combustión y aumentado su eficiencia térmica no han sido adoptadas por las familias como elemento confiable para la fabricación del alimento, bien sea porque les

suponía un inconveniente de usar o por ser insuficiente para sus necesidades específicas de cocina. Por lo tanto parte de la solución radica en aprender a diseñar y adaptar estufas y servicios a los requisitos y condiciones locales [222]. Ya que la intrusión de técnicas que a priori y a nuestro juicio ofrezcan una solución a una problemática, por razones culturales pueden no ser tomada de esta manera por las comunidades, según lo ejemplifica la investigación de M. Khandelwal y col. [223], donde muestran porque en la India han fallado las iniciativas de estufas mejoradas para la preparación de alimentos.

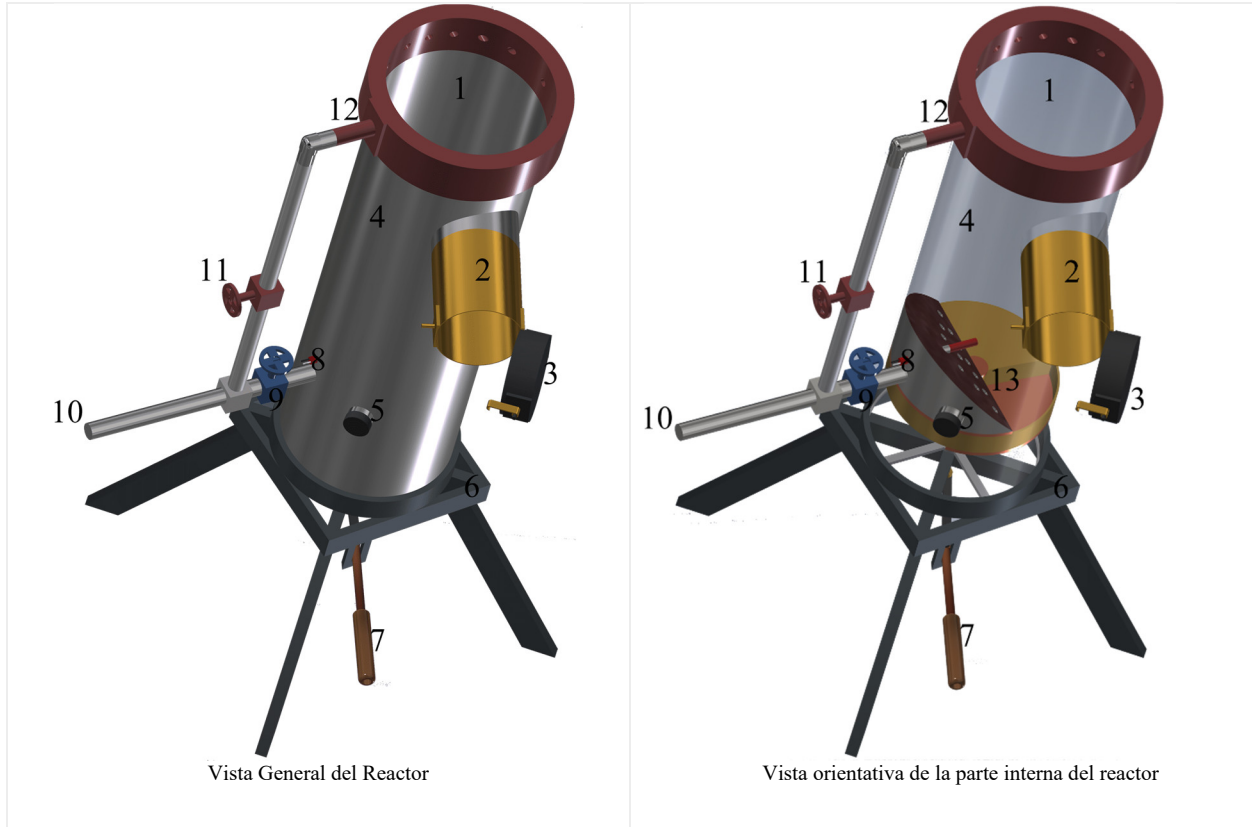
Atendiendo el análisis anterior, se realizaron muchas consideraciones para poder diseñar un reactor, que de una manera práctica, pudiera ofrecer una alternativa a la combustión de la biomasa Guadua Angustifolia Kunth.

**Objetivo Principal:**

Diseñar un reactor de gasificación en corriente ascendente y combustión directa utilizando Guadua Angustifolia Kunth como combustible, a ser utilizado en la cocción de alimentos, calentamiento de estancias o incluso en la desalinización de agua de mar de forma doméstica.



### Prototipo Diseñado



*Figura 7.1. Partes del reactor de gasificación para combustión directa.*

La **Figura 7.1**, muestra numeradas las partes internas y externas del reactor, las cuales se describen a continuación y se ilustran con más detalle en las imágenes tomadas del modelo 3D del diseño realizado para este capítulo (**Anexo 4.1**).

#### **Partes del reactor de gasificación para combustión directa**

1\_ Zona de combustión: En esta zona tiene lugar la quema de los gases producto de la gasificación de la Guadua

2\_ Puerto de carga del material: desde esta zona se podrá ingresar la Guadua al reactor o realizar el reabastecimiento una vez encendido el reactor. Más adelante se detallará la granulometría a utilizar.

3\_ Tapa del puerto de carga: Permite la apertura y cierre de del puerto de carga para el ingreso del material.

4\_ Cuerpo del reactor: Tubo cilíndrico metálico, con aislamiento para altas temperaturas, al cual van unidas las partes principales del sistema.

5\_ Puerto de ignición por llama: desde este punto con ayuda de un fuego se aportará la energía para el encendido del sistema.

6\_ Estructura de soporte: Mantendrá fijo el reactor

7\_ Removedor de cenizas: permite mover el sistema interno de remoción de cenizas

8\_ Resistencia de encendido eléctrico: al conectar eléctricamente la resistencia, esta se calentará y transmitirá la energía al material para el encendido del sistema.

9\_ Válvula reguladora de aire de gasificación: Permite controlar las condiciones de la gasificación. (Regular la potencia de reactor)

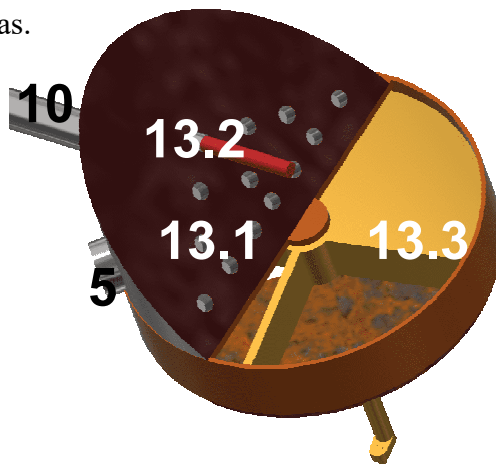
10\_ Puerto de entrada de aire: a este puerto se conecta la ventilación forzada que aportará el aire para la gasificación y combustión según convenga.

11\_ Válvula reguladora de aire de combustión: Permite el ingreso del aire a la zona de combustión y a su vez ajustar la cantidad idónea para una óptima reacción.

12\_ Distribuidor de aire de combustión: distribuye el aire alrededor de la zona de combustión

13\_ Zona de gasificación: esta zona está compuesta por un distribuidor de aire (13.1), que alberga la resistencia eléctrica de encendido (13.2), a este distribuidor le ingresa el aire por el puerto 10, a este distribuidor también se comunica el puerto 5 de ignición por llama y la parrilla giratoria con sistema de limpieza de cenizas. (13.3) En la **Figura 7.2**, se muestran estas partes

internas. Las partes del reactor que están en esta zona son las que están expuestas a muy altas temperaturas, por lo tanto se deben utilizar aceros especiales y calibres adecuados para estas condiciones[202] . En el **Anexo 4.2** se muestran imágenes tomadas del modelo 3D del diseño realizado para este capítulo, que ilustran la zona de gasificación y las partes que conforman el sistema de remoción de cenizas.



*Figura 7.2. Zona de gasificación con sus partes.*

### **Condiciones de granulometría de la Guadua Angustifolia a ser utilizada en el reactor**

Según V. Kirubakaran 2009 [161] y M. Inayat 2016 [224]. Cuanto menor sea el tamaño de la biomasa mejor será la transferencia de calor, pero también partículas muy finas tienden a formar tapones que dificultan el paso del aire lo que conlleva al apagado del gasificador, lo mismo que partículas muy grandes pueden formar puentes e impedir que la biomasa se mueva hacia abajo, por tal motivo hasta un 10% del tamaño del hogar de combustión sería recomendable [157].

Para nuestro diseño del sistema gasificador de combustión directa, un factor importante es evitar al máximo un consumo extra de energía para acondicionar la biomasa, esto con el ánimo de lograr el menor esfuerzo posible al utilizar la Guadua Angustifolia como combustible, pero también manteniendo un compromiso razonable de operatividad y con un tamaño de partícula adecuado que garantice una óptima reacción del material en el reactor.

Por la morfología de la Guadua Angustifolia se determinó que el menor esfuerzo para cortar la Guadua en partes pequeñas y homogéneas, era cortarla primero de forma paralela a sus fibras, consiguiendo la mayor cantidad de secciones posible (aproximadamente 2cm x 1cm), y luego cortar estas tiras en trozos de 5 a 7cm, para obtener un tamaño de partícula a aproximada a los 2cm x1cm x6cm. Dado que la densidad de la Guadua está entre 0,5 y 0,7  $g/cm^3$  [2], [225]. Promediando 0,6  $g/cm^3$ , cada pequeño trozo tendrá un peso cercano a 7,2gramos.

En la **Figura 7.3**, se detalla el tamaño inicial de la vara de Guadua Angustifolia, el tamaño siguiente de las tiras y el tamaño final con que el material ingresará al reactor. En esta misma gráfica se muestra el volumen que ocupa un kilogramo de Guadua en tiras y a manera orientativa el peso de un  $cm^3$  de Guadua Angustifolia Kunth, donde se constata que su densidad promedio es 0,6  $g/cm^3$ .



*Figura 7.3. Detalles de tamaños y densidad de la Guadua Angustifolia Kunth.*

Para lograr obtener este tamaño estándar se diseñó una herramienta de corte manual, modificando un modelo existente llamado anillo de cuquillos, [226]. (**Figura 7.4**).

El modelo propuesto se ilustra en la **Figura 7.5**. Este permite trabajar un rango mayor de diámetros de varas de Guadua y obtener tramos más pequeños, a su vez el diseño con mango central macizo, permite propiciar un impacto directo al material, facilitando el proceso corte de tiras de Guadua. En el **Anexo 4.3** se muestran imágenes ilustrativas del modelo 3D del diseño propuesto para seccionado de Guadua Angustifolia.



*Figura 7.4. Anillo de cuchillos para lateado de Guadua. Fuente: <http://mes-bambous-bis.blogspot.com/p/cette-outils-permet-de-fendre-une-canne.html>*



*Figura 7.5. Modelo propuesto para seccionado de Guadua Angustifolia.*

**Funcionamiento del reactor de gasificación en corriente ascendente y combustión directa utilizando Guadua Angustifolia Kunth como combustible.**

Paso 1: Cargamos el reactor con 500 gramos de Guadua troceada (70 piezas).

Paso 2: Iniciamos la ventilación (ventilador a 12 voltios) para cocción de alimentos con un modelo de 20W es suficiente. Aumentar la potencia del ventilador para evaporación de agua de mar.

Paso 3: Aportamos la energía calorífica para el enciendo, bien sea con la resistencia eléctrica o con una llama, cuando se utilice encendido por llama, el puerto 5 se tendrá que cerrar una vez arranque el reactor. En todo caso este puerto se deberá mantener siempre cerrado.

Paso 4: Por medio de las válvulas 9 y 11 se regulará la cantidad de aire para las reacciones, aportando inicialmente mayor cantidad de aire a la zona de gasificación, esto con el objetivo de elevar rápidamente la temperatura de esta zona y lograr las condiciones para esta reacción.

Paso 5: por medio de la válvula 11, regular la cantidad de aire para la una óptima combustión.

Paso 6: colocar el medio o intercambiador de calor a la cual iremos a transferir la energía térmica de nuestro proceso. Más adelante se mostrará un intercambiador de calor diseñado para desalinizar agua de mar por evaporación y que puede trabajar con este reactor.

Paso 7: A medida que se vaya agotando el material y se desee continuar trabajando, se puede aportar más Guadua troceada, abriendo el puerto 2 (puerto de carga). Una vez ingresado el material se debe cerrar este puerto de carga. Este puerto deberá permanecer siempre cerrado.

Paso 8: El reactor dispone de un sistema para remover las cenizas, para trabajo en continuo esta tarea se puede realizar en plena operación. Por medio de la manija (parte 7) se realizará un

movimiento hacia adelante y a hacia atrás, esto provocará un movimiento giratorio a la parrilla (parte 13.3) que arrastrará las cenizas fuera de la zona de gasificación, más adelante se detallará el funcionamiento del sistema de limpieza de cenizas.

### **Funcionamiento del sistema de remoción de cenizas**

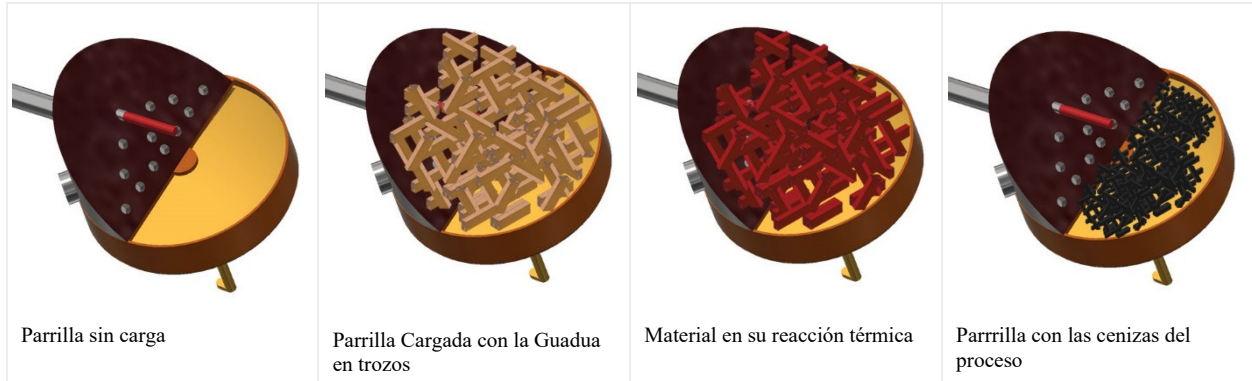
Para un adecuado funcionamiento del reactor es necesario ir removiendo la masa del material que ya haya reaccionado por completo (cenizas). Modelos básicos de gasificación han utilizado un sistema de parrilla colgante, la cual se agita a intervalos para ir despejando la ceniza de la zona afectada [165]. Este sistema no ha funcionado del todo bien con las cenizas de *Guadua Angustifolia*, ya que dichas cenizas a altas temperaturas tienden a mantenerse unidas y sus fibras muy difícilmente se desintegran. La **Figura 7.6** muestra el momento final del proceso y la ceniza formada.



*Figura 7.6. Final del proceso de gasificación de *Guadua Angustifolia* y sus cenizas.*

### ***Funcionamiento del sistema de remoción de cenizas propuesto para el reactor de gasificación en corriente ascendente y combustión directa.***

La secuencia de imágenes (**Figura 7.7**), muestran los momentos desde la carga del material, su proceso de encendido y reacción, hasta la generación de las cenizas.



*Figura 7.7. Secuencia ilustrativa del proceso térmico hasta la generación de ceniza.*

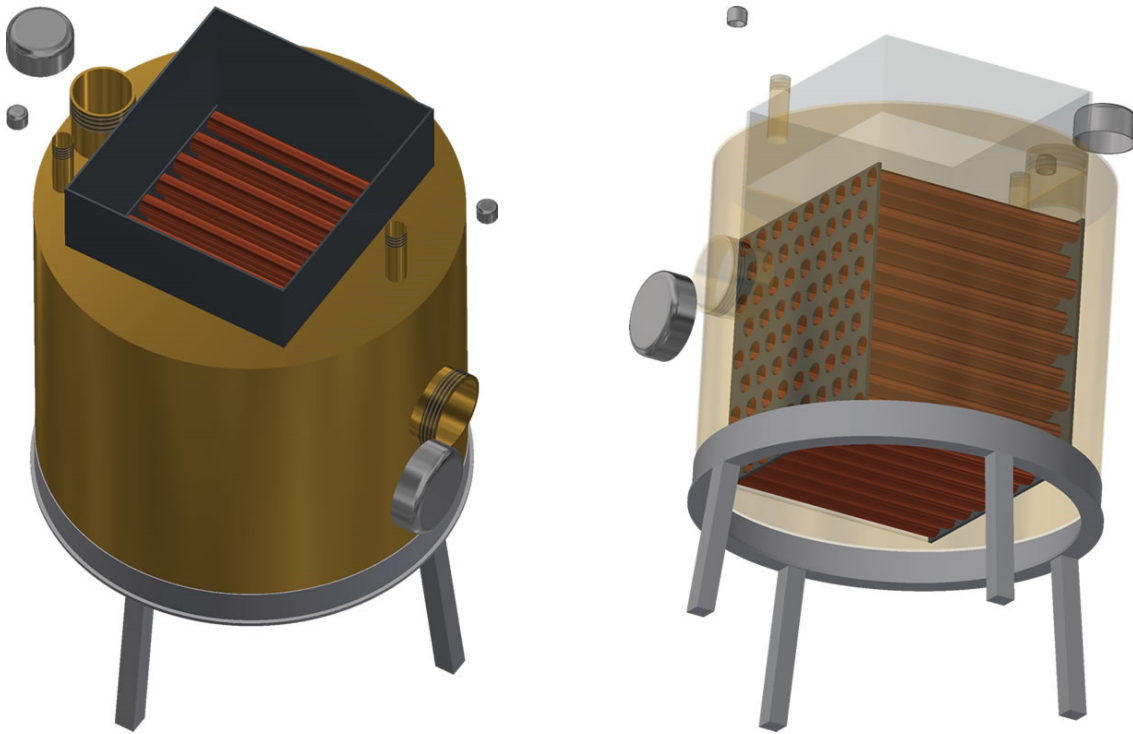
Utilizando el mecanismo biela manivela, logramos que al mover hacia adelante y hacia atrás la manija (parte 7), la parrilla giratoria (parte 13.3), gire en su eje 360 grados. Con este giro la parrilla arrastra las cenizas presentes en la zona de gasificación, (parte 13) lanzándolas al exterior, este proceso se realiza sin mayor perturbación de las reacciones térmicas, ya que todo ocurre sin apagar el reactor y manteniendo cerrada esta zona de altas temperaturas. Ver la secuencia del mecanismo en las gráficas (Figura 7.8).



*Figura 7.8. Secuencia del movimiento de la parrilla giratoria, removiendo las cenizas.*



**Modelo de intercambiador de calor para trabajar con el reactor de gasificación en corriente ascendente y combustión directa.**



*Figura 7.9. Intercambiador de calor para calentamiento o evaporación de agua, vista exterior y vista orientativa interior.*

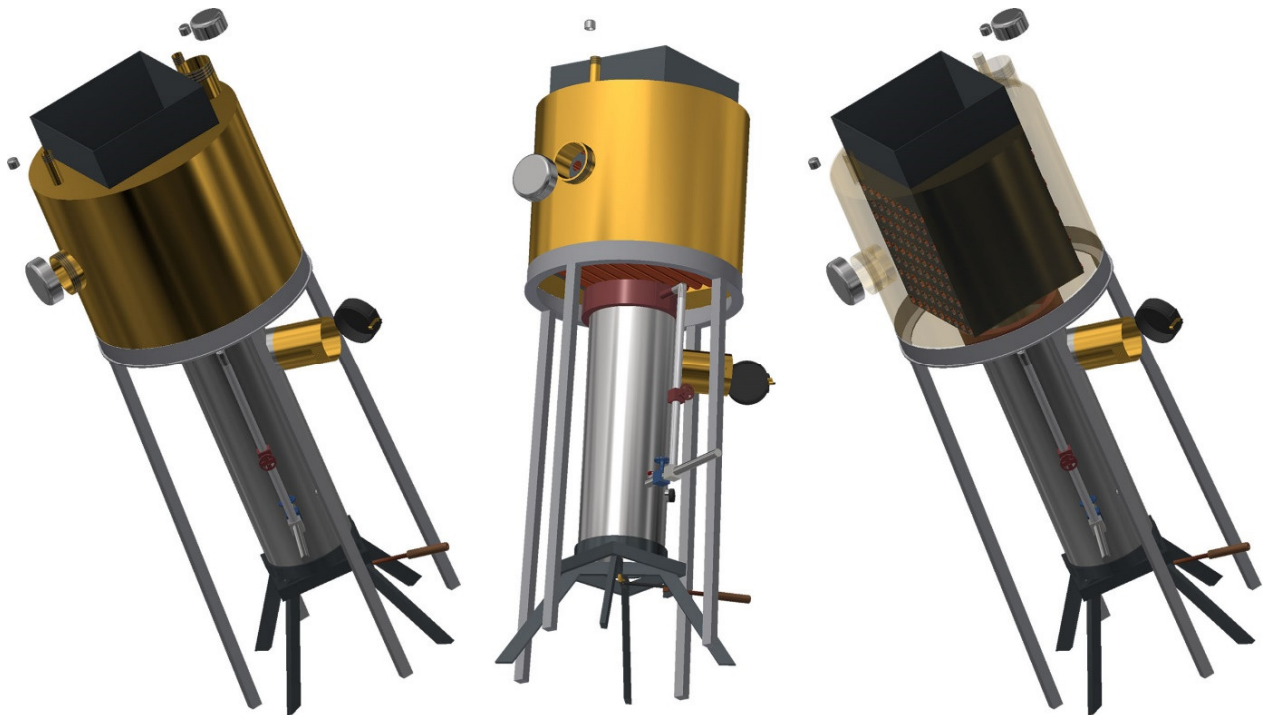
El principio de funcionamiento, se asemeja a la forma como trabajan los calentadores de agua a gas, (calentadores de paso o Calentador de agua circulante) donde la llama calienta intercambiador de calor, serpentín de cobre por donde circula el agua. De esta forma el calor de combustión del gas se transfiere al agua de una forma bastante rápida.

El modelo propuesto consta de un haz de tubos que van conectados a cilindro, que alberga en su interior el agua a la cual pretendemos calentar o evaporar, el cilindro está conectado internamente con los tubos del intercambiador, permitiendo con esto que el agua inunde los tubos

del intercambiador. De esta manera cuando la llama y los gases calientes incidan en los tubos, se transferirá gran parte de esa energía al agua, elevando su temperatura hasta su ebullición.

El cilindro tiene cuatro puertos de entrada/salida con sus respectivas tapas, estos pueden ser usados para la carga del agua a calentar o evaporar y para la salida del vapor o el agua caliente. El puerto lateral puede ser usado para limpieza interna los tubos del intercambiador y de la parte interior del mismo cilindro. (**Figura 7.9**).

La **Figura 7.10** muestra la disposición de elementos para la utilización del intercambiador de calor con el reactor de gasificación para combustión directa. Para mayor comprensión del lector, se ilustran dos vistas sólidas y una vista orientativa del interior del intercambiador, para visualizar el detalle de la relación reactor-Intercambiador.



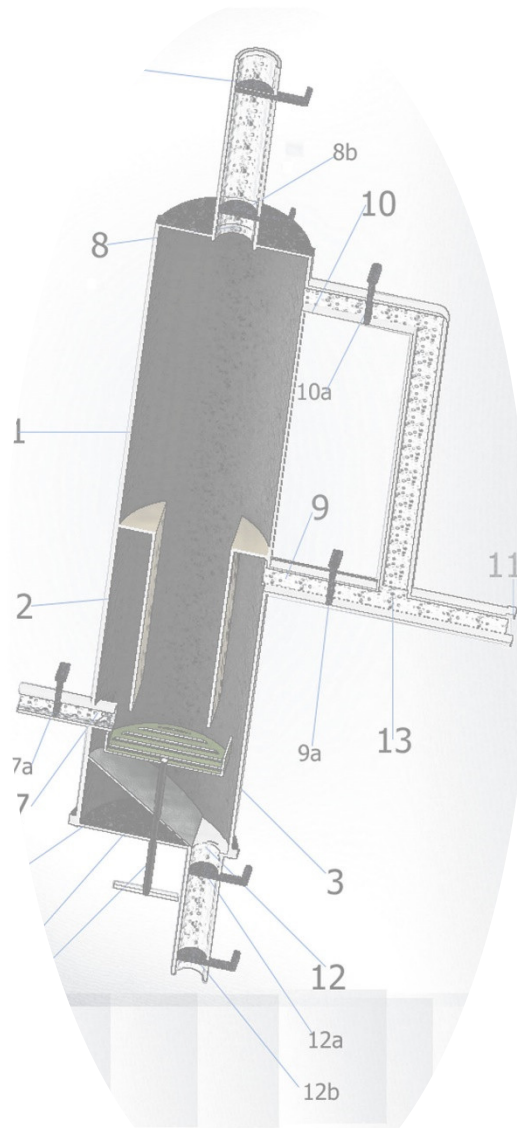
*Figura 7.10. Vistas de la ubicación del intercambiador de calor para trabajar con el reactor de gasificación de combustión directa.*

## CAPÍTULO 8

### REACTOR DE GASIFICACIÓN DE CONFIGURACIÓN MÚLTIPLE PARA BIOMASA

(GUADUA ANGUSTIFOLIA KUNTH)

(Patente Concedida)



En este capítulo se describe la patente concedida al autor de esta Tesis por el gobierno colombiano a un modelo de reactor de gasificación de lecho fijo, que permite ser configurado para trabajar de tres formas diferentes; en corriente ascendente, corriente descendente y en corriente cruzada. El modelo de reactor fue concebido para trabajar especialmente con biomasa – Guadua Angustifolia u otro tipo de bambú.

El documento de este capítulo sigue el formato utilizado por la oficina de patentes del Ministerio de Industria y Comercio Colombiano. Se anexa resolución de la concesión de la patente. (**Anexo 3**).

### **Reactor de Gasificación de Configuración Múltiple para Biomasa (Guadua Angustifolia Kunth)**

La presente invención se refiere a un reactor de gasificación perfeccionado, de los que se utilizan para producir gas a partir de la descomposición termoquímica de la biomasa. El modelo propuesto puede ser configurado para operar de 3 formas diferentes; en corriente descendente, ascendente y en corriente cruzada y manejar aire o vapor de agua como agente gasificante.

Tecnología Anterior. Los reactores de gasificación han sido utilizados desde hace mucho tiempo para la obtención de gas a partir de biomasa mayoritariamente de tipo leñoso. Estos reactores están compuestos generalmente por un cuerpo cilíndrico de acero, con un puerto para alimentación de materia prima, un puerto de entrada para el agente gasificante (aire o vapor de agua), un puerto para la ignición, un puerto de salida para el gas, un puerto de salida para cenizas y alberga en su interior una zona donde ocurre el proceso de combustión de parte de la biomasa que crean las condiciones de temperaturas para el proceso completo de la gasificación. La corriente de gas la crea un sistema artificial de aspiración. Una vez obtenido el gas, siguen unas etapas

complementarias para limpieza, enfriamiento, filtrado (ciclón, radiador, filtro, extractor) y de allí a su utilización como gas combustible.

Cada tipo gasificador se ajusta a una aplicación en especial y a un manejo reducido de materias primas, lo que limita su utilización. Es de esta manera que para obtener un gas apropiado para motores de combustión se recomienda un gasificador tipo corriente descendente, para aplicaciones donde se queme directamente el gas se recomienda el tipo corriente ascendente y para aplicaciones básicas con uso prioritario de carbón vegetal se utiliza el reactor tipo corriente cruzada.

### **Descripción de la Invención.**

El reactor de gasificación que la invención propone, ha sido concebido y estructurado en orden de resolver las limitaciones de los gasificadores de lecho fijo convencionales, ya que reúne un solo reactor las propiedades de las 3 principales configuraciones de dichos reactores, ampliando con esto su utilización para la mayoría de biomásas y para las diferentes aplicaciones energéticas tales como: gas para generación de electricidad por medio de motores de combustión o gas para aplicaciones térmicas donde el gas obtenido se quema directamente.

El reactor de gasificación propuesto está constituido por un cuerpo cilíndrico de acero, que lleva en interior otro cilindro de menores dimensiones, una serie de puertos de entradas y salidas estratégicamente ubicados en el cilindro exterior. Todos los puertos poseen una llave que permiten su apertura o cierre según convenga y dos de estos puertos se unen por intermedio de una te, en el interior del cilindro exterior está ubicada una parrilla giratoria anclada a la base tapa roscada del fondo del cilindro exterior, que permite moverla para evitar acumulación de cenizas en la zona de combustión. Este reactor se adapta a las etapas complementarias para limpieza, enfriamiento, filtrado (ciclón, radiador, filtro, extractor) por medio de una unión universal metálica roscada.

**Descripción de las figuras.**

Para complementar la descripción que se está realizando y con objeto de ayudar a una mejor comprensión de las características del invento, se acompaña a la presente memoria descriptiva, como parte integrante de la misma, un juego de dibujos en donde con carácter ilustrativo y no limitativo, se ha representado lo siguiente:

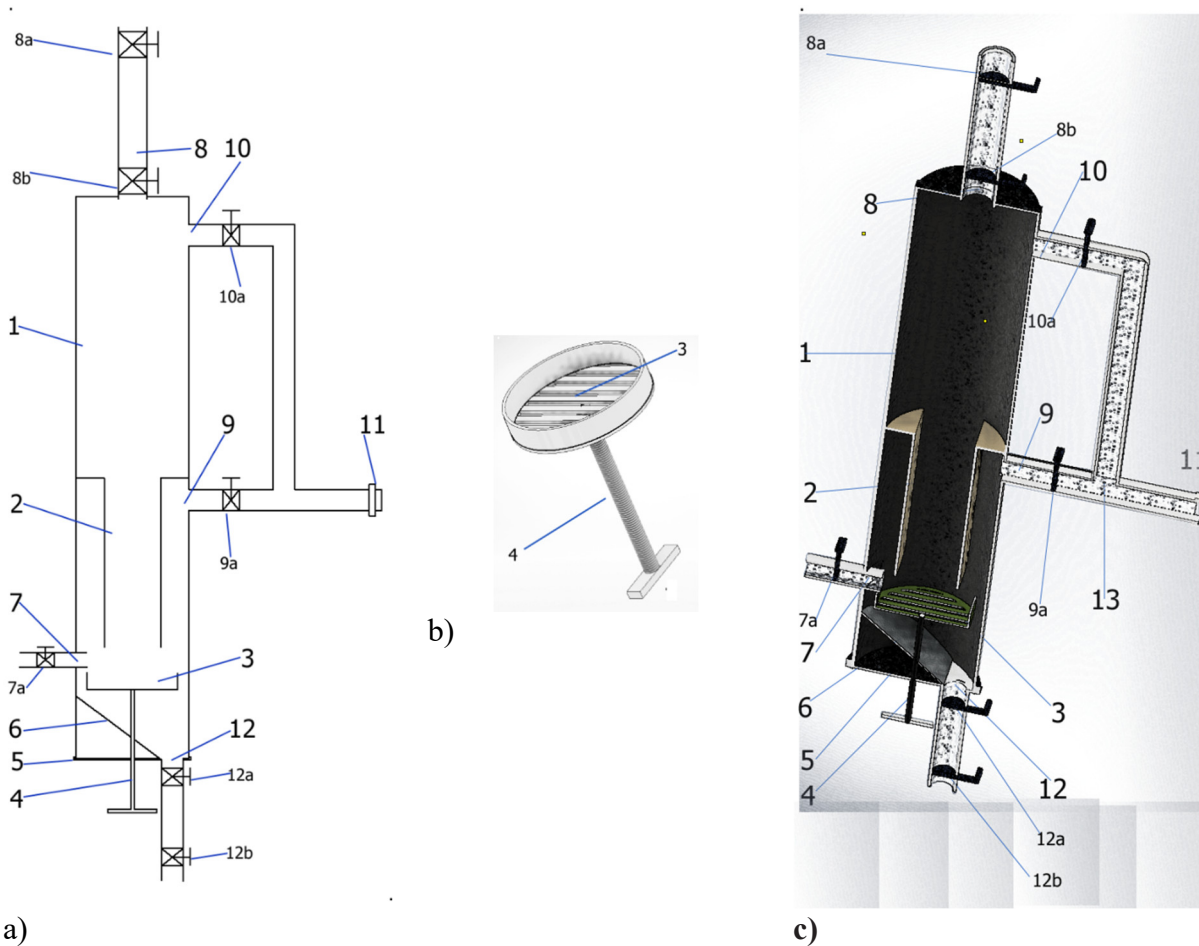


Figura 8.1. a) Partes del reactor de gasificación, b) Parrilla giratoria, c) Vista ilustrativa del interior del reactor

**Partes del Reactor**

1-Cilindro exterior

2-Cilindro interior

3- Zona de Combustión

4- Parrilla giratoria con varilla roscada

5- Tapa inferior roscada

6-Platina de canalización de cenizas

7-Puerto de ignición o puerto de entrada de gasificante para configuración corriente ascendente o cruzada.

7 a - llave de puerto de ignición

8- Puerto de alimentación de materia prima o entrada de agente gasificante para configuración tipo corriente descendente

8a y 8b – llaves de puerto 8

9- Puerto de salida para configuración tipo corriente descendente o corriente cruzada.

9 a- Llave para puerto 9

10 - Puerto de salida para configuración tipo corriente ascendente

10 a – Llave para el puerto 10

11- Unión universal roscada

12- Puerto de salida para cenizas

12a y 12b – Llave para salidas de cenizas

13- TE para unión de puertos 9 y 10

A la vista de las **Figura 8.1** (a, b, c), puede observarse como el reactor de gasificación propuesto, está estructurado a partir de un cuerpo cilíndrico de acero (1), que lleva en interior otro cilindro (2), soldado de forma concéntrica a una altura media del cilindro exterior y que se prolonga hasta una tercera parte la longitud del cilindro exterior, donde se encuentra con la zona

de combustión (3). Esta zona está constituida por una parrilla giratoria (4) la cual esta soportada por una varilla roscada y sirve para evitar la acumulación de cenizas y material de escoria, esta misma zona se comunica con el puerto ignición (7), por este puerto ingresa los agentes gasificantes.

El reactor utiliza sus puertos de entradas y salidas (7), (8), (9), (10), (12) con sus respectivas llaves (7a), (8a, 8b), (9a), (10a), (12a, 12b) para configurar el tipo de gasificador deseado, de esa manera configuramos el gasificador para la actividad y el manejo de la materia prima deseada.

### **Modo de utilización**

El reactor de gasificación propuesto se puede operar de tres formas diferentes.

#### ***Como reactor tipo corriente descendente:***

La materia prima se alimenta por el puerto de entrada (8) utilizando la apertura llaves (8a) y (8b), una vez cargado dejan abiertas las llaves del puerto 8 y se activa el sistema artificial de aspiración (sistema propio de la manejo de reactores de gasificación ), paso seguido y con ayuda de un soplete se inicia el proceso de encendido del gasificador alimentando llama por el puerto de ignición (7) con apertura previa de la llave de este puerto (7 a ), se cierra la llave (10 a) y se abre la llave (9 a ), las llaves de la salida de cenizas (12 a y 12 b) se cierran, cuando el gasificador haya arrancado se cierra el puerto de ignición (7).

De esta forma y una vez iniciado el proceso de descomposición termoquímica de la materia prima, el gas producido es forzado a pasar desde la zona de combustión al puerto de salida (9). El agente gasificante entra directamente por el puerto (8) y pasa por el mismo recorrido de la materia a gasificar.



***Como reactor tipo corriente ascendente:***

La materia prima se alimenta por el puerto de entrada (8) utilizando la apertura y cierre de las llaves (8a) y (8b), una vez cargado se cierran las llaves del puerto 8 y se activa el sistema artificial de aspiración (sistema propio de la manejo de reactores de gasificación), paso seguido y con ayuda de un soplete se inicia el proceso de encendido del gasificador alimentando llama por el puerto de ignición (7) con apertura previa de la llave de este puerto (7 a). La llave de este puerto se deja abierta pues será el puerto de entrada del agente gasificante. Luego se cierra la llave (9 a) y se abre la llave (10 a). Las llaves de la salida de cenizas (12 a y 12 b) se cierran.

De esta forma y una vez iniciado el proceso de descomposición termoquímica de la materia prima, el gas producido es forzado a pasar desde la zona de combustión atravesando la materia prima hasta salir por la parte superior puerto (10).

***Como reactor tipo corriente cruzada:***

La materia prima se alimenta por el puerto de entrada (8) utilizando la apertura y cierre de las llaves (8a) y (8b), una vez cargado se cierran las llaves del puerto 8 y se activa el sistema artificial de aspiración (sistema propio del manejo de reactores de gasificación), paso seguido y con ayuda de un soplete se inicia el proceso de encendido del gasificador alimentando llama por el puerto de ignición (7) con apertura previa de la llave de este puerto (7 a), la llave de este puerto se deja abierta pues será el puerto de entrada del agente gasificante, luego se cierra la llave (10 a) y se abre la llave (9 a), las llaves de la salida de cenizas (12 a y 12 b) se cierran.

De esta forma y una vez iniciado el proceso de descomposición termoquímica de la materia prima, el gas producido es forzado a pasar directamente desde la zona de combustión a la salida puerto (9)

Las anteriores configuraciones se logran con solo combinar las aperturas y cierres de las llaves de los puertos de entradas y salidas.

-Para las configuraciones de corriente ascendente y corriente cruzada el gasificador se puede alimentar de materia prima en pleno funcionamiento, solo con abrir y cerrar alternadamente las llaves (8a y 8b) del puerto de entrada (8).

-Para el caso de configuración corriente descendente; el gasificador puede ser alimentado de forma continua sin ninguna operación, pues el puerto de entrada de materia prima es el mismo del agente gasificante (siempre permanecen abiertos).

### **Reivindicación**

1) Un Reactor de gasificación de Lecho Fijo para Corriente Descendente, Ascendente y Corriente Cruzada para la obtención de un gas combustible por descomposición termoquímica de biomasa de origen leñoso, caracterizado por estar compuesto por un cuerpo cilíndrico (1), que lleva en interior otro cilindro (1), dos de puertos de entradas (7), (8) y tres puertos de salidas (9), (10), (12) ubicados en el cilindro exterior, todos los puertos poseen llaves (7a), (8a, 8b), (9a), (10a), (12a, 12b), que permiten su apertura o cierre según convenga y dos de estos puertos (9 y 10) se unen por intermedio de una te (13), en el interior del cilindro exterior está ubicada una parrilla giratoria (4) anclada a la base tapa roscada (5) del fondo del cilindro exterior, para remoción de cenizas de la zona de combustión (3).

## CAPÍTULO 9

### PRUEBAS EXPERIMENTALES Y FUTURAS INVESTIGACIONES PARA LA GUADUA ANGUSTIFOLIA KUNTH



### **Etapa Experimental**

Una vez caracterizada la biomasa Guadua Angustifolia Kunth y los procesos térmicos de pirólisis combustión y gasificación realizamos pruebas con este material para diferentes aplicaciones, con el ánimo de conocer su viabilidad como combustible a ser utilizado por comunidades rurales de Colombia. Una de las pruebas se documenta en este capítulo.

Evaporación de agua de mar utilizando Guadua Angustifolia como combustible.

Según la Organización Mundial de la Salud (OMS) un adulto necesita aproximadamente dos litros de agua por día, pero considera que según el clima la actividad que se desarrolle y la dieta, podía variar a 7,5 litros, cantidad de agua para hidratación preparación de alimentos.[227]. Ya existen tecnologías que pueden convertir el agua de mar, en agua dulce y potable, a precios competitivos, (\$US0.64) por metro cúbico según lo cita Chenoweth 2008 [228]. Pero estos proyectos normalmente los realizan naciones desarrolladas con economías fuertes.

En la costa Atlántica Colombiana la zona árida de la Guajira presenta un gran problema por falta de suministro de agua dulce, una solución para satisfacer las necesidades básicas de agua por familia, podría estar en que cada familia pudiera desalinizar su agua de consumo.

Como respuesta a la anterior problemática, se planteó la construcción de una estufa tipo (rocket stove), modificada para aprovechar eficientemente la energía calorífica de la combustión de Guadua Angustifolia u otra biomasa disponible para evaporar agua de mar. Se construyó y se realizaron pruebas de ebullición y evaporación para determinar su eficiencia. Obteniendo 3.2 litros de agua desalinizada por cada kilogramo de Guadua Angustifolia utilizada.

### **Estufa cohete (rocket stove ).**

Este modelo de estufa mejora las condiciones de combustión, permitiendo aprovechar el calor de los gases de combustión y manteniendo la alimentación de aire por el efecto chimenea, [229], [230]. Este tipo de estufa consumen sustancialmente menos combustible comparado con estufas o fogones tradicionales, lo que conlleva a una disminución de esfuerzos para los usuarios al tener que transportar menos leña, esto también repercute en beneficios ambientales y salud [231]. Una mejora a este tipo de estufas resulta en la adición de ventilación forzada, la cual logra optimizar la mezcla gases-aire y tener control de la potencia de la estufa [232]. En la **Figura 9.1** se muestran dos modelos existentes de estufa cohete.



*Figura 9.1. Estufas cohete (Rocket Stove), izquierda con aislamiento térmico y derecha sin aislamiento térmico.  
Fuente: izquierda tomada de <https://wildstoves.co.uk/product/ezystove/>, derecha tomada de <https://i.pinimg.com/736x/fb/f9/eb/fb9eb4d6674be95eff9cd51be27edf4.jpg>*

### **Construcción de estufa cohete (Rocket Stove), adaptada para evaporar agua de mar.**

Bajo los anteriores criterios se diseñó y construyó un prototipo de estufa cohete adaptada para calentamiento de agua o para evaporar agua de mar utilizando como combustible Guadua Angustifolia Kunth. Para su construcción se utilizaron materiales metálicos reciclados de uso no alimentario, ya que con este dispositivo solo pretendíamos conocer y validar el comportamiento

del prototipo en cuanto a su eficiencia en el aprovechamiento térmico de la *Guadua Angustifolia* para el calentamiento de agua o para la evaporación de agua de mar. En la **Figura 9.2** se muestra la secuencia de su fabricación.



*Figura 9.2. Construcción de la estufa cohete (Rocket Stove), modificada para evaporación de agua de mar.*

### Prueba de ebullición de agua de Mar con estufa cohete modificada.

La secuencia de imágenes de la **Figura 9.3**, ambienta el proceso de calentamiento hasta la ebullición de agua de mar. Para comprobar la estanqueidad de la estufa cohete y el funcionamiento de esta en el proceso de ebullición, se cargó el reactor con una disolución de 19.35 litros de agua y 650gramos de sal marina (simulando la composición del agua de mar 3.3%). Se pesaron 2kg de Guadua troceada como combustible disponible, se procedió a encender la estufa y se tomó el tiempo de inicio.



*Figura 9.3. Pruebas de ebullición de agua de mar.*

Se controló la temperatura del agua y a los 89°C se suspendió la alimentación de combustible. Luego cuando el agua llegó a los 93 °C, se registró el tiempo final. (Temperatura de ebullición del agua en Bogotá Colombia a 2550 metros sobre el nivel del mar). Se removieron las cenizas y el residuo inquemado, una vez fríos se pesaron. El peso total de cenizas fue 32g y el inquemado 20g, de los 2kg de combustible se utilizó 0.77kg, por lo tanto el combustible invertido para calentar los 20 litros de agua, desde la temperatura inicial (20°C) hasta la temperatura de ebullición en Bogotá Colombia 93°C, fue 0.75kg de Guadua Angustifolia. Utilizando un tiempo de 24 minutos. Teóricamente en condiciones ideales para calentar 20 litros de agua de mar partiendo de 20°C hasta los 93°C, se necesitaría una energía de 5675 kJ, como utilizamos Guadua Angustifolia con un poder calorífico de 17550 kJ/kg, la eficiencia o grado de aprovechamiento térmico fue aproximadamente 43%. (**Tabla 9.1**).

*Tabla 9.1. Resultados prueba de ebullición de agua de mar con Guadua Angustifolia como combustible*

MASA DE GUADUA (kg)	TEMPERATURA INICIAL DEL AGUA °C	TEMPERATURA FINAL DEL AGUA °C	CANTIDAD DE AGUA (Litros)	TIEMPO EMPLEADO (min)	EFICIENCIA TÉRMICA (%)
0,75	20	93	20	24	43%

El prototipo presentó un buen comportamiento, el humo solo se apreció al momento del encendido, el cual duró aproximadamente 3 minutos. (Se utilizó soplete a gas). Este Prototipo puede ser utilizado para tareas de calentamiento de agua, utilizando Guadua como combustible u otro tipo de biomasa disponible. Es un modelo económico y sencillo de fabricar y solo requiere de un miniventilador de menos de 10W para su funcionamiento. La Prueba se realizó con una mezcla de agua y sal marina al 3.3%, ya que el trabajo se llevó a cabo en Bogotá Colombia. (Zona no costera). Para posibles implementaciones se debe construir con materiales de uso alimentario y en lo posible utilizar manta o material de aislamiento para reducir perdidas de calor.



### Prueba de desalinización de agua de mar con estufa cohete modificada



*Figura 9.4. Estufa cohete modificada para evaporación de agua de mar.*

Luego de la prueba de ebullición la estufa se selló con una tapa superior, y se habilitaron dos puertos con llaves para entrada de agua y/o salida de vapor como se observa en la **Figura 9.4**



*Figura 9.5. Serpentina de enfriamiento y caudal de condensado*

Procedimiento:

Se cargó el reactor por una de las llaves con una disolución de 19.35 litros de agua y 650gramos de sal marina (simulando la composición del agua de mar 3.3%). Luego la llave se cerró.

En la otra llave se conectó una serpentina de cobre sumergida en agua para lograr su enfriamiento, como se observa en la **Figura 9.5**.

Se pesaron 3 kilogramos de Guadua, se realizó el encendido del reactor y se registró el tiempo de inicio, se suministró el material de forma gradual hasta el minuto 87, tiempo en el que se agotaron los 3 kilogramos de Guadua y se evidenció visualmente su completa combustión.

Pasado 5 minutos se recogió el ultimo condensado (agua desalinizada), y se midió el total recolectado. (**Figura 9.5**).

La metodología aplicada intentó caracterizar el proceso de la forma más real, en una posible operación de un usuario, esto con el ánimo de contemplar un rango alto de pérdidas.

En condiciones ideales la energía requerida para evaporar un litro de agua (20°C) es de aproximadamente 2550 kJ, en nuestra práctica obtuvimos 9.6 litros de agua (desalinizada) a una temperatura de 30°C, y 9.4 litros de agua que quedaron en el reactor a 90°C, por lo tanto la energía necesaria para evaporar esta cantidad de agua en condiciones ideales tendría que ser aproximadamente 24480kJ/kg, más los 2597 kJ de energía para calentar los 9.4 litros de agua a 90°C, para un total de una energía requerida para este caso de 27077 kJ.

La cantidad de Guadua quemada fue de 3 kg, y dado que este material tiene un poder calorífico superior de 17550 kJ/kg, el aprovechamiento de la energía calorífica de la Guadua fue de un 51.5%. (**Tabla 9.2**).

*Tabla 9.2. Resultados prueba de evaporación de agua de mar con guadua angustifolia como combustible.*

<b>MASA DE GUADUA (kg)</b>	<b>AGUA DESALINIZADA (Litros)</b>	<b>AGUA SIN EVAPORAR (Litros)</b>	<b>TIEMPO EMPLEADO (min)</b>	<b>EFICIENCIA TÉRMICA (%)</b>
3	9,6	9.4	92	51.5%

El modelo para implementación tendrá que ser construido con materiales especiales para uso alimentario (acero inoxidable), y contar con aislamiento para disminuir perdidas.

Se estima que un reactor de estas características para desalinizar 10 litros de agua hora, con precios de materiales del mercado colombiano costaría menos de 250 dólares Americanos.

El modelo de reactor construido para la evaporación de agua de mar sirvió para comprobar técnico económicamente la viabilidad para la obtención de 20 litros vitales de agua diaria por familia a partir de la evaporación de agua de mar, con Guadua Angustifolia u otro tipo de biomasa disponible, como posible estrategia de mitigación inmediata al problema de falta de agua dulce y potable en comunidades costeras de la Guajira colombiana.

## **Futuras investigaciones para la Guadua Angustifolia Kunth**

### **1. Utilización de los gases de combustión de la Guadua para carbonatación inducida de tableros Guadua- Cemento.**

La carbonatación inducida consiste en aplicar CO<sub>2</sub> a mezclas cementicias ricas en CaO en condiciones adecuadas para su reacción, y lograr convertir esta mezcla en carbonato cálcico, confiriendo una mejores características estructurales a la mezcla resultante y a su vez almacenando de forma permanente el CO<sub>2</sub> en un producto para construcción sostenible [233]. La investigación de J.G. Jang y H.K. Lee. 2016, mostró un aumento en la resistencia mecánica del mortero de cemento Pórtland curado por carbonatación y observó la alta difusividad del CO<sub>2</sub> en un medio poroso [234]. Las condiciones favorables para la carbonatación pasan por contar con una humedad entre el 50% y el 75%, buena permeabilidad de la mezcla cementicia y concentraciones de CO<sub>2</sub> disponible [235], La carbonatación baja el PH de las mezclas cementicias lo que provoca la corrosión de los refuerzos metálicos del concreto, pero en mezclas sin refuerzos metálicos la carbonatación conduce notables mejoras en su comportamiento estructural. [235], [236].

#### ***Tableros de Guadua Cemento***

Se han desarrollado varios estudios para la elaboración de tableros para construcción con cemento reforzado con micro fibras de Guadua [237], tableros laminados encolados fabricados con Guadua Angustifolia [238]–[240], tableros termoacústicos fabricados con Guadua y espuma de poliuretano [241], donde se ha destacado el excelente comportamiento de la Guadua como material constructivo, por su resistencia al impacto y ventajas de sismoresistencia.

Nuestra próxima investigación plantea evaluar experimentalmente la utilización los gases de combustión de la Guadua Angustifolia Kunth para curar por carbonatación inducida páneces constructivos fabricados con malla de Guadua y cemento expansivo. (Figuras 9.6 y 9.7)



Figura 9.6. Pruebas con cemento expansivo.



Figura 9.7. Pruebas de fabricación de páneces constructivos con malla de guadua y cemento expansivo.

Este tipo de panel liviano fabricado con Guadua Angustifolia y Cemento expansivo planteará una alternativa muy económica a la construcción tradicional con bahareque. Se plantea utilizar la Guadua Angustifolia Kunth como material de refuerzo y realizar la carbonatación inducida para lograr la microdensificación de la mezcla cementicia, manteniendo su estructura porosa que le otorga cualidades termoacústicas. Este tipo de panel podrá ser revocado para mejores terminados.

## **2. Diseño y construcción de un reactor para la obtención de bio-aceite a partir de la Guadua Angustifolia Kunth**

Una vez caracterizada la Guadua Angustifolia Kunth, en el proceso de pirólisis para la obtención de combustible líquido según lo tratado en el Capítulo 5, “Composición del Combustible Líquido Obtenido por Pirólisis Rápida de la Guadua Angustifolia Kunth “ es conveniente continuar con el desarrollo de un prototipo de reactor para la obtención de bio-aceite y realizar su valoración técnico - económica, como posible alternativa para la generación de electricidad con motores de combustión interna, a ser utilizados en comunidades rurales de Colombia.

## CONCLUSIONES

La investigación llevada a cabo en esta Tesis Doctoral está centrada en el estudio del aprovechamiento energético del bambú *Guadua Angustifolia Kunth* mediante procesos termoquímicos. Así, se efectuó la caracterización de la *Guadua* mediante diversos análisis (elemental, inmediato, poder calorífico, elementos mayoritarios y minoritarios y composición estructural) y se estudió, mediante análisis termogravimétrico, su comportamiento durante la pirolisis y la combustión. Asimismo, se analizaron la composición del bio-combustible líquido obtenido a partir de la pirolisis rápida de la misma. Finalmente, se desarrolló un reactor de bajo coste que permite llevar a cabo su valorización energética mediante gasificación. Los estudios realizados han permitido extraer las siguientes conclusiones:

La *Guadua* tiene una composición elemental, un poder calorífico y una composición estructural similar al resto de biomásas de tipo lignocelulósicas, con la particularidad de presentar altas concentraciones de los elementos mayoritarios K y Si. Además, posee la ventaja de tratarse de un tipo de biomasa de rápido crecimiento, fácil adaptabilidad a diferentes tipos de terrenos, bajas necesidades de mantenimiento en el cultivo y que presenta mecanismos de auto-propagación. Todas estas características, unidas al hecho de que no se emplee para la alimentación, la convierten en un material idóneo para su utilización como combustible y material constructivo, lo que puede presentar importantes ventajas económicas y medioambientales.

El análisis termogravimétrico con una velocidad de calentamiento de 10 °C/min de la pirolisis de la *Guadua* revela que esta tiene lugar fundamentalmente en el intervalo de temperaturas 200 °C – 370 °C, produciéndose la máxima velocidad de descomposición térmica a 325 °C. El cálculo de las energías de activación mediante el método isoconversional de Vyazovkin indica que sus valores varían entre 198 y 226 kJ/mol para el intervalo de grados de conversión entre 10% y 90%. Los

principales compuestos que se emiten son  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CH}_3\text{OH}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  y  $\text{H}_2$ , pero también aparecen, aunque en menor proporción, los compuestos no deseables  $\text{H}_2\text{S}$  y  $\text{HCl}$ .

El análisis termogravimétrico de la combustión de la Guadua con  $\text{O}_2$  pone de manifiesto que, a una velocidad de calentamiento de  $10\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ , esta tiene lugar fundamentalmente en el intervalo de temperaturas  $154\text{ }^\circ\text{C} - 333\text{ }^\circ\text{C}$ , produciéndose la máxima velocidad de reacción a  $285\text{ }^\circ\text{C}$ . En la etapa  $154\text{ }^\circ\text{C} - 315\text{ }^\circ\text{C}$  se produce fundamentalmente la desvolatilización y la combustión de los volátiles, mientras que en la etapa  $315\text{ }^\circ\text{C} - 333\text{ }^\circ\text{C}$  tiene lugar fundamentalmente la combustión del char. El cálculo de las energías de activación mediante el método Coats-Redfern, a una velocidad de calentamiento de  $2,5\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ , proporciona los valores  $88,9$  y  $125,8\text{ kJ/mol}$  para los intervalos  $154\text{ }^\circ\text{C} - 339\text{ }^\circ\text{C}$  y  $339\text{ }^\circ\text{C} - 468\text{ }^\circ\text{C}$ , respectivamente. Tal como cabía esperar, los principales productos de la combustión son  $\text{H}_2\text{O}$  y  $\text{CO}_2$ , presentando su máximo de formación a  $285\text{ }^\circ\text{C}$ . Sin embargo, también se aprecia, aunque en proporciones mucho menores, la formación de compuestos de  $\text{Cl}$  y  $\text{S}$ .

De la comparación de los perfiles de combustión (en  $\text{O}_2$ ) y pirolisis (en  $\text{N}_2$ ) de la Guadua a la misma velocidad de calentamiento ( $10\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ ), se deduce que la etapa de desvolatilización durante la combustión (pirolisis oxidativa) se acelera significativamente respecto a la desvolatilización durante la pirolisis. Así, durante la pirolisis oxidativa se alcanzan mayores velocidades de pérdida de peso finalizando el proceso a menor temperatura, lo que se debe a la oxidación heterogénea de las fracciones pirolizables de la Guadua a baja temperatura. El hecho de que se produzca dicha oxidación heterogénea, está relacionado con el empleo de un flujo de  $\text{O}_2$  y, probablemente, con la presencia de una elevada concentración de potasio en la Guadua, que puede actuar como catalizador debilitando los enlaces de la materia orgánica y facilitando la transferencia de oxígeno. Por lo tanto, a pesar del bajo rendimiento en cenizas de la Guadua, la materia inorgánica contenida



en la misma tiene una importancia sustancial en su comportamiento durante su procesado termoquímico.

La pirolisis rápida de la Guadua a 500 °C durante 30 segundos origina un bio-aceite que contiene aldehídos, cetonas, ésteres, ácidos, alcoholes, compuestos orgánicos heterocíclicos, compuestos aromáticos y levoglucosano, siendo la concentración de fenoles especialmente notable. A pesar del alto contenido de potasio de la Guadua, que actúa como catalizador fuerte de las reacciones de fragmentación de celulosa favoreciéndolas sobre las reacciones de despolimerización que conducen a la formación de levoglucosano, a partir de la pirolisis rápida de la misma se obtienen proporciones relativamente altas de levoglucosano. Sin embargo, debe destacarse que existen diversos factores que influyen en la composición del bio-aceite, tales como la temperatura, el tiempo de residencia, la materia mineral y su composición.

La Guadua Angustifolia Kunth presenta características muy adecuadas para ser empleada como materia prima en procesos de transformación termoquímica, tales como la pirólisis o gasificación, que permitan obtener a partir de la misma combustibles líquidos o gaseosos. Por lo tanto, este tipo de biomasa lignocelulósica puede considerarse una seria alternativa para la mitigación de las carencias energéticas existentes en comunidades rurales colombianas, en las que este recurso presenta una gran disponibilidad.

Así, se ha desarrollado un reactor de gasificación de bajo coste y de configuración múltiple que permite llevar a cabo la gasificación en corriente ascendente, descendente o corriente cruzada. El empleo de este tipo de equipos de fabricación local para el aprovechamiento energético de la Guadua Angustifolia permitiría mejorar la calidad de vida de las comunidades rurales colombianas que sufren desabastecimiento energético, puesto que se trata de un abundante material autóctono que, por desconocimiento y falta de medios tecnológicos, no se está aprovechando lo suficiente.

Es posible la implementación de pequeños reactores para obtener combustible líquido o gaseoso a partir de la gasificación o la pirólisis de la Guadua Angustifolia. Asimismo, también es posible emplear este tipo de biomasa como combustible sólido para la combustión en estufas que alcancen una alta eficiencia gracias a una gasificación previa del material, en comunidades rurales de Colombia. De esa forma, se podrían disminuir los problemas medioambientales y de salud asociados al uso ineficiente de leña como combustible.

Es necesario seguir investigando para adaptar las tecnologías de transformación termoquímica a las realidades locales, de forma que se puedan aprovechar los recursos disponibles para la generación de energía de forma descentralizada.

El conocimiento del entorno y la técnica aplicada y un consumo razonable nos permitirán generar una cultura de utilización responsable de los recursos naturales, para satisfacer nuestras necesidades sin poner en riesgo el futuro de las próximas generaciones.

---

**BIBLIOGRAFÍA**

- [1] X. Londoño, "El bambú en Colombia," *Bioteología Vegetal*, vol. 11, no. 3, pp. 143–154, 2011.
- [2] C. P. Takeuchi, "Caracterización Mecánica del Bambú Guadua Laminado para uso Estructural," Universidad Nacional de Colombia, 2014.
- [3] N. Rodríguez, W. . Dill, and P. Bidegaray, "Utilización del Bambú (*Guadua Angustifolia* Kunth.) (Bambusoideae: Gramineae), como una Alternativa Sostenible de Construcción de Viviendas en la Zona Atlántica de Costa Rica," *Tierra Tropical*, vol. 2, pp. 77–85, 2006.
- [4] J. J. Prías-Barragán, N. A. Echeverry-Montoya, and H. Ariza-Calderón, "Fabricación y caracterización de carbón activado y de nanoplaquetas de carbón a partir de *Guadua angustifolia* Kunth para aplicaciones en electrónica," *Rev. la Acad. Colomb. Ciencias Exactas, Físicas y Nat.*, vol. 39, no. 153, pp. 444–449, 2015.
- [5] E. M. Vaca Duque and M. D. Ortégón Lozano, "Producción de Encurtido de Guadua," *Repositorio Universidad Tecnológica de Pereira*. Universidad Tecnológica de Pereira, pp. 1–55, 2007.
- [6] D. C. Espinosa-Pérez, "La Cadena de la Guadua en Colombia - Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural - Colombia," 2004.
- [7] E. Giraldo Herrera and A. Sabogal Ospina, *Una Alternativa Sostenible. La Guadua : Técnicas de Cultivo y Manejo*. Armenia - Colombia: Corporación Autónoma Regional del Quindío (C.R.Q.), 1999.
- [8] V. Carmiol Umaña, "Bambú Guadua: un recurso ecológico," *Tecnol. en Marcha*, vol. 22, pp. 3–9, 2009.
- [9] M. Uribe Vallejo and A. Durán Contreras, "Estudio de Elementos Solicitados a Compresión Armados por tres Guaduas," Universidad Nacional de Colombia, 2002.
- [10] X. Londoño, "Aspectos Sobre la Distribución y la Ecología de los Bambues de Colombia," *Caldesia*, vol. 16, pp. 139–153, 1990.
- [11] N. Riaño, X. Londoño, Y. López, J. Gómez, and G. C. Camayo, "Plant growth and biomass distribution on *Guadua angustifolia* Kunth in relation to ageing in the Valle del Cauca - Colombia," *Bamboo Sci. Cult.*, vol. 16, no. 1, pp. 43–51, 2002.
- [12] Lisardo Moreno, "Colombia Planea Sembrar 2 Millones de Hectáreas de Guadua," *CARACOL RADIO*, Neiva - Colombia, 2018.
- [13] J. C. Camargo García, A. M. Arango Arango, and M. A. Amezcua Berjan, "Evaluación de la oferta de residuos de biomasa de guadua para propósitos energéticos en el Eje Cafetero de Colombia," *Recursos Naturales y Ambiente*, vol. 65, pp. 90–94, 2013.

- [14] IDAE- Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, *Biomasa: Gasificación*. MADRID-ESPAÑA, 2007.
- [15] L. Monge, "VI Simposio Internacional Energía y Frontera Tecnológica en el Sector Rural," in *Experiencia en Gasificación de Biomasa para Generación de Energía*, 2010.
- [16] E. Salas Delgado, "Actualidad y Futuro de la Arquitectura de Bambú en Colombia," Universitat Politècnica de Catalunya, 2008.
- [17] Guadabambucolombia.com, "Algunos Beneficios Ambientales y Forestales al Sembrar Guadua Bambú," <https://guadabambucolombia.com>, 2013. [Online]. Available: <https://guadabambucolombia.com/guadua-inmunizada/plantas-guadua-bambu/>. [Accessed: 15-Feb-2019].
- [18] S. M. Young and W. S. Judd, "Systematics of the *Guadua angustifolia* Complex (Poaceae: Bambusoideae)," *Ann. Missouri Bot. Gard.*, vol. 79, no. 4, p. 737, 1992.
- [19] M. Becerra Bustamante and S. M. Steffany, "Caracterización del Carbón Vegetal a partir de Bambú (*Guadua Angustifolia* Kuth.)." Escuela Académico Profesional de Ingeniería Agroindustrial y Comercio Exterior, Pimentel – Perú, p. 99, 2017.
- [20] H. Valbuena, N. Jiménez, N. Canal, P. Galeano, and M. Cuadros, "Daño De *Myelobia* Sp . ( lepidoptera : pyralidae ) En Plantaciones de *Guadua Angustifolia* Kunth en el Departamento del Tolima," *Rev. Tumbaga*, vol. 3, pp. 54–62, 2008.
- [21] Jorge Sáenz v., "En Penumbras: 2,5 millones de Colombianos no tienen Energía Eléctrica," *PERIÓDICO EL ESPECTADOR*, 07-Aug-2017.
- [22] NATURGAS-COLOMBIA, "INDICADORES 2018," Bogotá - Colombia, 2018.
- [23] A. Martínez Villegas, "Subsidios para Reemplazar el Consumo de leña por Gas LP," *La nota Economica.com*, 2018. [Online]. Available: <http://lanotaeconomica.com.co/opinion/columnas/subsidios-para-reemplazar-el-consumo-de-lena-por-gas-lp.html>. [Accessed: 23-Jan-2019].
- [24] J. F. Ramírez Quirama and A. L. Taborda Vergara, "Consumo de Leña en Fogones Tradicionales en Familias Campesinas del Oriente Antioqueño," *Prod. + Limpia*, vol. 9, no. 1, pp. 99–114, 2014.
- [25] Instituto Nacional del Carbón, "CSIC.es - Análisis inmediato." [Online]. Available: <http://www.incar.csic.es/analisis-inmediato>. [Accessed: 24-Jan-2019].
- [26] E. B. Vásquez Sierra and J. F. Herrera Builes, "Metodología para la Caracterización de Combustibles Sólidos Maderables del Área Metropolitana del Valle de Aburrá," *Rev. Fac. Nac. Agron.*, vol. 59, no. 2, pp. 3557–3564, 2006.
- [27] N. Romo Ortega, A. F. Toro, L. M. Flores Pardo, and A. Cañas Velasco, "Evaluación de las propiedades fisicoquímicas y térmicas de tallos de café y su análisis económico para la producción de pellets como biocombustible sólido," *Ing. Recur. Nat. y del Ambient.*, no. 10, pp. 79–91, 2011.

- [28] D. Escarda-Amo, "Análisis de Gasificación de la Central de Puerto Llano," Universidad Carlos III de Madrid, 2017.
- [29] D. Vamvuka, D. Zografos, and G. Alevizos, "Control methods for mitigating biomass ash-related problems in fluidized beds," *Bioresour. Technol.*, vol. 99, no. 9, pp. 3534–3544, 2008.
- [30] A. Demirbas, "Combustion characteristics of different biomass fuels," *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 30, no. 2, pp. 219–230, 2004.
- [31] A. Demirbas, "Calculation of higher heating values," vol. 76, no. 5, pp. 431–434, 1997.
- [32] T. H. Jayah, L. Aye, R. J. Fuller, and D. F. Stewart, "Computer simulation of a downdraft wood gasifier for tea drying," *Biomass and Bioenergy*, vol. 25, pp. 459–469, 2003.
- [33] P. P. Dutta, V. Pandey, A. R. Das, S. Sen, and D. C. Baruah, "Down draft gasification modelling and experimentation of some indigenous biomass for thermal applications," *Energy Procedia*, vol. 54, pp. 21–34, 2014.
- [34] J. Salovaara, "Characterization of a Downdraft Gasifier Fueled by Bamboo – a Pilot Project in Mexico," Tampere University Of Technology, 2015.
- [35] H. Romero Tehuitzil, "Producción de gas de síntesis ( gasificación de bambú )," *Instituto de Investigaciones Eléctricas Boletín IIE*, pp. 80–85, 2015.
- [36] C. Keith-K.H, J. P. Barford, and G. McKay, "Production of activated carbon from bamboo scaffolding waste - Process design, evaluation and sensitivity analysis," *Chem. Eng. J.*, vol. 109, no. 1, pp. 147–165, 2005.
- [37] A. Velázquez-Trujillo, E. Bolaños-Reynoso, and Y. S. Pliego-Bravo, "Optimización de la producción de carbón activado a partir de bambú," *Rev. Mex. Ing. Qum.*, vol. 9, no. 3, pp. 359–366, 2010.
- [38] J. J. Prías Barragán, C. A. Rojas, N. A. Echeverry, G. Fonthal, and H. Ariza, "Identificación de variable óptimas para la obtención de Carbón Activado a partir del precursor *Guadua angustifolia* Kunth," *Rev. Acad. Colomb. las Ciencias Exactas Físicas y Nat.*, vol. XXXV, no. 135, pp. 157–166, 2011.
- [39] M. Instituto de Química-UNAM, "Análizador Elemental por Combustión (C, H, N, S)." [Online]. Available: [http://www.cciqs.uaemex.mx/index.php?option=com\\_content&view=article&id=74:analizador-alias&catid=34:labs-alias&Itemid=11](http://www.cciqs.uaemex.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=74:analizador-alias&catid=34:labs-alias&Itemid=11). [Accessed: 23-Jan-2019].
- [40] Universidad de Alicante - Servicios Técnicos de Investigación, "ANÁLISIS ELEMENTAL," 2019. [Online]. Available: <https://sstti.ua.es/es/instrumentacion-cientifica/unidad-de-rayos-x/analisis-elemental.html>. [Accessed: 28-Apr-2019].
- [41] M. B. Folgueras, F. J. Fernández, C. R. Ardila, M. Alonso, and S. Lage, "Fast pyrolysis of *Guadua angustifolia* -Kunth," *Energy Procedia*, vol. 136, pp. 60–65, Oct. 2017.

- 
- [42] P. McKendry, "Energy production from biomass (part 1): overview of biomass," *Bioresour. Technol.*, vol. 83, no. July 2001, pp. 37–46, 2002.
- [43] J. G. Martín Chicharro, "Sistemas De Almacenamiento De Energía," Universidad De Valladolid, 2016.
- [44] Y. Piñeros-Castro, *Aprovechamiento de biomasa lignocelulósica, algunas experiencias de investigación en Colombia*, 1st ed. Fundación Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano, 2014.
- [45] C. F. Triana, J. A. Quintero, R. A. Agudelo, C. A. Cardona, and J. C. Higueta, "Analysis of coffee cut-stems ( CCS ) as raw material for fuel ethanol production," *Energy*, vol. 36, no. 7, pp. 4182–4190, 2011.
- [46] S. Vignote Peña and I. Martínez Rojas, *Tecnología de la madera*. Ediciones Mundi-Prensa, 2006.
- [47] S. Sánchez, A. J. Moya, M. Moya, I. Romero, and R. Torrero, "Aprovechamiento del residuo de poda del olivar Mediante conversión termoquímica," *Ing. Quim.* 391, pp. 194–202, 2002.
- [48] B. G. Salas-Enríquez, A. M. Torres-Huerta, E. Conde-Barajas, M. A. Domínguez-Crespo, L. Díaz-García, and M. de la L. X. Negrete-Rodríguez, "Activated carbon production from the *Guadua amplexifolia* using a combination of physical and chemical activation," *J. Therm. Anal. Calorim.*, vol. 124, no. 3, pp. 1383–1398, Jun. 2016.
- [49] J. M. De Juana-Sardón, *Energías renovables para el desarrollo*. Paraninfo, 2003.
- [50] J. Felix-Fernandez, "Poder calorífico," *Cátedra Máquinas Térmicas*. Universidad Tecnológica Nacional, Mendoza Argentina, pp. 1–22, 2012.
- [51] P. Basu, *Biomass Gasification and Pyrolysis Practical Design and Theory*. Elsevier Inc, 2010.
- [52] J. Posom and P. Sirisomboon, "Evaluation of lower heating value and elemental composition of bamboo using near infrared spectroscopy," *Energy*, vol. 121, pp. 147–158, 2017.
- [53] C. D. Cooper, B. Kim, and J. MacDonald, "Estimating the lower heating values of hazardous and solid wastes," *J. Air Waste Manag. Assoc.*, vol. 49, no. 4, pp. 471–476, 1999.
- [54] J.-F. Coronel-Toro, L. Pérez, and M. de O. Lombard, "Colección de Tablas, Gráficas y Ecuaciones de Transmisión de Calor Versión 3.6." UNIVERSIDAD DE SEVILLA ESPAÑA, 2016.
- [55] H. Wang, X. Wang, Y. Cui, Z. Xue, and Y. Ba, "Slow pyrolysis polygeneration of bamboo (*Phyllostachys pubescens*): Product yield prediction and biochar formation mechanism," *Bioresour. Technol.*, vol. 263, no. March, pp. 444–449, Sep. 2018.

- [56] S. A. (Departamento de E. BESEL and IDAE, *Cultivos energéticos*, IDAE (Inst. MADRID-ESPAÑA: IDAE (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía) ELABORACIÓN, 2007.
- [57] A. Álvarez Rodríguez, C. Pizarro Garcia, and M.-B. Folgueras Díaz, "Caracterización química de biomasa y su relación con el poder calorífico," *Repos. Inst. la Univ. Oviedo*, pp. 1–12, 2012.
- [58] AENOR, *Norma Española UNE-EN 15290 Biocombustibles Sólidos Determinación de Elementos Mayoritarios*. ESPAÑA, 2011, pp. 1–18.
- [59] J. Mata Sánchez, "Optimización de Metodologías para la Caracterización de Biocombustibles Sólidos Procedentes de la Industria del Olivar," Universidad de Córdoba España, 2015.
- [60] L. Fryda, C. Daza, J. Pels, A. Janssen, and R. Zwart, "Lab-scale co-firing of virgin and torrefied bamboo species *Guadua angustifolia* Kunth as a fuel substitute in coal fired power plants," *Biomass and Bioenergy*, vol. 65, pp. 28–41, Jun. 2014.
- [61] AENOR, *Norma Española UNE-EN 15297 Biocombustibles Sólidos Determinación de Elementos Minoritarios*. España, 2011, pp. 1–15.
- [62] UPTC, "Termogravimetría." Universidad Politécnica de Cartagena, Cartagena España, pp. 1–26.
- [63] E. Manals, M. Penedo, and G. Giralt, "Análisis y térmico diferencial de diferentes biomasa vegetales," *Tecnología Química*, vol. XXXI, no. 2, pp. 36–43, 2011.
- [64] A.-F. González-Rojas and J. M. Barraza-Burgos, "Características termogravimétricas de carbonizados obtenidos a altas velocidades de calentamiento," *Revista Ingeniería e Investigación*, vol. 29, no. 2, pp. 25–34, 2009.
- [65] Mustafa Balat, Mehmet-Balat, Elif-Kirtay, and Havva-Balat, "Main routes for the thermo-conversion of biomass into fuels and chemicals. Part 1: Pyrolysis systems," *Energy Convers. Manag.*, vol. 50, no. 12, pp. 3147–3157, 2009.
- [66] Niels-Muller, C. Tessini, C. Segura, G. Hector, and A. Berg, "Pirólisis rápida de biomasa." *Bioenergía & Biorrefinaria - Cana-de-Açúcar & Espécies Florestais*, p. 15, 2013.
- [67] D. Mohan, C. U. Pittman, and P. H. Steele, "Pyrolysis of Wood/Biomass for Bio-oil: A Critical Review," *Energy & Fuels*, vol. 20, no. 3, pp. 848–889, May 2006.
- [68] A. V. Bridgwater, "Principles and practice of biomass fast pyrolysis processes for liquids," *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, vol. 51, pp. 3–22, Jul. 1999.
- [69] I. Wilkomirsky, E. Moreno, and A. Berg, "Bio-Oil Production from Biomass by Flash Pyrolysis in a Three-Stage Fluidized Bed Reactors System," *J. Mater. Sci. Chem. Eng.*, vol. 2, no. February, pp. 6–10, 2014.

- 
- [70] G. Brem and E. A. Bramer, "PyRos : a new flash pyrolysis technology for the production of bio-oil from biomass residues," *Proc. Int. Conf. Exhib. bioenergy outlook*, no. January, pp. 1–14, 2007.
- [71] L. E. Hernandez-Mena, A. A. B. Pécora, and A. L. Beraldo, "Slow pyrolysis of bamboo biomass Slow Pyrolysis of Bamboo Biomass : Analysis of Biochar Properties," *Chem. Eng. Trans.*, vol. 37, pp. 115–120, 2014.
- [72] A. V. Bridgwater, "Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading," *Biomass and Bioenergy*, vol. 38, pp. 68–94, Mar. 2012.
- [73] Y.-K. Park *et al.*, "Wild reed of Suncheon Bay: Potential bio-energy source," *Renew. Energy*, vol. 42, pp. 168–172, Jun. 2012.
- [74] M. B. Folgueras and R. M. Díaz, "Influence of FeCl<sub>3</sub> and lime added to sludge on sludge-coal pyrolysis," *Energy*, vol. 35, no. 12, pp. 5250–5259, 2010.
- [75] C. G. Paucar Alvarez, A. I. Díaz Garzón, D. Ribero Rodriguez, K. Quintero Alvarez, and C. P. García García, "Boletín de Ciencias de la Tierra," no. 26, pp. 39–46, 2009.
- [76] A. Gregorio and D. Oliva, "Characterisation of Sugar Cane Bagasse Through Thermal Analysis," *Inf. Tecnol.*, vol. 14, no. 4, pp. 91–96, 2003.
- [77] K. Raveendran, A. Ganesh, and K. C. Khilar, "Pyrolysis characteristics of biomass and biomass components," *Fuel*, vol. 75, no. 8, pp. 987–998, 1996.
- [78] H. Yang, R. Yan, H. Chen, D. H. Lee, and C. Zheng, "Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis," *Fuel*, vol. 86, no. 12–13, pp. 1781–1788, Aug. 2007.
- [79] C. Quan, N. Gao, and Q. Song, "Pyrolysis of biomass components in a TGA and a fixed-bed reactor: Thermochemical behaviors, kinetics, and product characterization," *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, vol. 121, pp. 84–92, 2016.
- [80] Z. Jiang, Z. Liu, B. Fei, Z. Cai, Y. Yu, and X. Liu, "The pyrolysis characteristics of moso bamboo," *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, vol. 94, pp. 48–52, Mar. 2012.
- [81] V. Dhyani and T. Bhaskar, "A comprehensive review on the pyrolysis of lignocellulosic biomass," *Renew. Energy*, vol. 129, pp. 695–716, Dec. 2018.
- [82] S. Vyazovkin, "Evaluation of activation energy of thermally stimulated solid-state reactions under arbitrary variation of temperature," *J. Comput. Chem.*, vol. 18, no. 3, pp. 393–402, Feb. 1997.
- [83] D. Trache, A. Abdelaziz, and B. Siouani, "A simple and linear isoconversional method to determine the pre-exponential factors and the mathematical reaction mechanism functions," *J. Therm. Anal. Calorim.*, vol. 128, no. 1, pp. 335–348, Apr. 2017.
- [84] C. Jia, J. Chen, J. Bai, X. Yang, S. Song, and Q. Wang, "Kinetics of the pyrolysis of oil sands based upon thermogravimetric analysis," *Thermochim. Acta*, vol. 666, no. June, pp. 66–74, Aug. 2018.



- [85] J. Y. Yeo, B. L. F. Chin, J. K. Tan, and Y. S. Loh, "Comparative studies on the pyrolysis of cellulose, hemicellulose, and lignin based on combined kinetics," *J. Energy Inst.*, vol. 92, no. 1, pp. 27–37, Feb. 2019.
- [86] S. Vyazovkin, A. K. Burnham, J. M. Criado, L. A. Pérez-Maqueda, C. Popescu, and N. Sbirrazzuoli, "ICTAC Kinetics Committee recommendations for performing kinetic computations on thermal analysis data," *Thermochim. Acta*, vol. 520, no. 1–2, pp. 1–19, Jun. 2011.
- [87] S. Vyazovkin *et al.*, "ICTAC Kinetics Committee recommendations for collecting experimental thermal analysis data for kinetic computations," *Thermochim. Acta*, vol. 590, pp. 1–23, Aug. 2014.
- [88] S. Vyazovkin, "Advanced isoconversional method," *J. Therm. Anal.*, vol. 49, no. 3, pp. 1493–1499, Aug. 1997.
- [89] L. Gašparovič, I. Hrablay, Z. Vojteková, and Ľ. Jelemenský, "Kinetic study of pyrolysis of waste water treatment plant sludge," *Chem. Pap.*, vol. 65, no. 2, pp. 139–146, Jan. 2011.
- [90] F. Yao, Q. Wu, Y. Lei, W. Guo, and Y. Xu, "Thermal decomposition kinetics of natural fibers: Activation energy with dynamic thermogravimetric analysis," *Polym. Degrad. Stab.*, vol. 93, no. 1, pp. 90–98, Jan. 2008.
- [91] H. L. Friedman, "Kinetics of thermal degradation of char-forming plastics from thermogravimetry. Application to a phenolic plastic," *J. Polym. Sci. Part C Polym. Symp.*, vol. 6, no. 1, pp. 183–195, 2010.
- [92] G. Jiang, D. J. Nowakowski, and A. V. Bridgwater, "A systematic study of the kinetics of lignin pyrolysis," *Thermochim. Acta*, vol. 498, no. 1–2, pp. 61–66, Jan. 2010.
- [93] J. A. M. JESÚS FERNÁNDEZ GONZÁLEZ, FERNANDO GUTIERREZ MARTIN, PABLO DEL RIO GONZÁLEZ, GUILLERMO SAN MIGUEL ALFARO, ALBERTO BAHILLO RUIZ, JOSE MARIA SANCHEZ HERVAS, MERCEDES BALLESTEROS PERDICES, JESÚS ÁNGEL VAZQUEZ MINGUELA, LUIS MIGUEL RODRIGUEZ ANTON, *Tecnologías para el uso y transformación de biomasa energética*. Madrid: Mundi-Prensa, 2015.
- [94] M. Van de Velden, J. Baeyens, A. Brems, B. Janssens, and R. Dewil, "Fundamentals, kinetics and endothermicity of the biomass pyrolysis reaction," *Renew. Energy*, vol. 35, no. 1, pp. 232–242, Jan. 2010.
- [95] M. Van de Velden, J. Baeyens, and I. Boukis, "Modeling CFB biomass pyrolysis reactors," *Biomass and Bioenergy*, vol. 32, no. 2, pp. 128–139, Feb. 2008.
- [96] R. Xiao and W. Yang, "Influence of temperature on organic structure of biomass pyrolysis products," *Renew. Energy*, vol. 50, pp. 136–141, Feb. 2013.
- [97] A. Dufour, P. Girods, E. Masson, Y. Rogeau, and A. Zoulalian, "Synthesis gas production by biomass pyrolysis: Effect of reactor temperature on product distribution," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 34, no. 4, pp. 1726–1734, Feb. 2009.

- 
- [98] W. Wijayanti and K. Tanoue, "Char Formation and Gas Products of Woody Biomass Pyrolysis," *Energy Procedia*, vol. 32, pp. 145–152, 2013.
- [99] J. M. O. Scurlock, D. C. Dayton, and B. Hames, "Bamboo: An overlooked biomass resource?," *Biomass and Bioenergy*, vol. 19, pp. 229–244, 2000.
- [100] B. . Jenkins, L. . Baxter, T. . Miles, and T. . Miles, "Combustion properties of biomass," *Fuel Process. Technol.*, vol. 54, pp. 17–46, Mar. 1998.
- [101] A. de-Lucas, C. Taranco, E. Rodriguez-Garcia, and P. Prieto Paniagua, *Biomasa, biocombustibles y sostenibilidad*. 2012.
- [102] J. Lluch Urpí, *Tecnología y margen de refinado del petróleo*. Ediciones Díaz de Santos, 2011.
- [103] I. Martínez, *Termodinámica básica y aplicada*. Dossat, 1992.
- [104] D. Schröder and U. Krewer, "Model based quantification of air-composition impact on secondary zinc air batteries," *Electrochim. Acta*, vol. 117, pp. 541–553, 2014.
- [105] T. Boushaki, J. C. Sautet, L. Salentey, and B. Labégorre, "The behaviour of lifted oxy-fuel flames in burners with separated jets," *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, vol. 34, no. 1, pp. 8–18, 2007.
- [106] M. Hupa, O. Karlström, and E. Vainio, "Biomass combustion technology development - It is all about chemical details," *Proc. Combust. Inst.*, vol. 36, no. 1, pp. 113–134, 2017.
- [107] J. F. Saldarriaga Elorza, "Avances en el modelado de la combustión de biomasa en spouted bed cónico," Universidad del País Vasco - España, 2015.
- [108] J. Koppejan and S. Van Loo, *The Handbook of Biomass Combustion and Co-firing*. Routledge, 2012.
- [109] B. Shen and Qinlei, "Study on MSW catalytic combustion by TGA," *Energy Convers. Manag.*, vol. 47, no. 11–12, pp. 1429–1437, Jul. 2006.
- [110] Y. Xu, shizhuang Lin, H. Yuan, K. Zhu, X. He, and G. Chen, "Thermogravimetric Analysis on the Combustion Characteristics for Blended Coals," *Challenges Power Eng. Environ.*, no. 1, pp. 153–156, 2009.
- [111] W. Hu *et al.*, "Determination of Ignition Temperature of Coal by Using Thermogravimetry," in *18th International Conference on Fluidized Bed Combustion*, 2005, vol. 2005, pp. 557–562.
- [112] X. Li, B. Ma, L. Xu, Z. Hu, and X. Wang, "Thermogravimetric analysis of the co-combustion of the blends with high ash coal and waste tyres," *Thermochim. Acta*, vol. 441, no. 1, pp. 79–83, Feb. 2006.
- [113] D. Vamvuka, N. El Chatib, and S. Sfakiotakis, "Measurements of ignition point and combustion characteristics of biomass fuels and their blends with lignite," *Combustion*, no. January 2011, p. 95, 2011.

- 
- [114] J. M. Jones *et al.*, “Low temperature ignition of biomass,” *Fuel Process. Technol.*, vol. 134, pp. 372–377, Jun. 2015.
- [115] M. Van Graan and J. R. Bunt, “Evaluation of A TGA Method to Predict the Ignition Temperature and Spontaneous Combustion Propensity of Coals of Different Rank,” in *International Conference on Advances in Science, Engineering, Technology and Natural Resources (ICASETNR-16) Nov. 24-25, 2016 Parys (South Africa)*, 2016, pp. 24–28.
- [116] B. Ramajo-Escalera, A. Espina, J. R. García, J. H. Sosa-Arno, and S. A. Nebra, “Model-free kinetics applied to sugarcane bagasse combustion,” *Thermochim. Acta*, vol. 448, no. 2, pp. 111–116, Sep. 2006.
- [117] M. J. Cutimbo Quispe, “Estudio Exploratorio Del Proceso De Cocombustión De Carbón Y Biomasa Mediante Análisis Termogravimétrico Para Su Aprovechamiento En La Generación De Calor,” Universidad Nacional de Colombia, 2017.
- [118] E. Granada, P. Eguía, J. A. Comesaña, D. Patiño, J. Porteiro, and J. L. Miguez, “Devolatilization behaviour and pyrolysis kinetic modelling of Spanish biomass fuels,” *J. Therm. Anal. Calorim.*, vol. 113, no. 2, pp. 569–578, Aug. 2013.
- [119] A. Álvarez, C. Pizarro, R. García, J. L. Bueno, and A. G. Lavín, “Determination of kinetic parameters for biomass combustion,” *Bioresour. Technol.*, vol. 216, pp. 36–43, Sep. 2016.
- [120] Q. Wang, W. Zhao, H. Liu, C. Jia, and H. Xu, “Reactivity and Kinetic Analysis of Biomass during Combustion,” *Energy Procedia*, vol. 17, pp. 869–875, 2012.
- [121] A. W. Coats and J. P. Redfern, “Kinetic Parameters from Thermogravimetric Data,” *Nature*, vol. 201, no. 4914, pp. 68–69, Jan. 1964.
- [122] Academia Testo, “Gases de combustión.” [Online]. Available: <http://www.academiatesto.com.ar/cms/gases-de-combustion-1>. [Accessed: 25-Feb-2019].
- [123] Y. Uemura, V. Sellappah, T. H. Trinh, S. Hassan, and K. Tanoue, “Torrefaction of empty fruit bunches under biomass combustion gas atmosphere,” *Bioresour. Technol.*, vol. 243, pp. 107–117, Nov. 2017.
- [124] A. Demirbas, “Biomass resource facilities and biomass conversion processing for fuels and chemicals,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 42, pp. 1357–1378, Jul. 2001.
- [125] P. Anselmo Filho and O. Badr, “Biomass resources for energy in North-Eastern Brazil,” *Appl. Energy*, vol. 77, pp. 51–67, Jan. 2004.
- [126] T. Kan, V. Strezov, and T. J. Evans, “Lignocellulosic biomass pyrolysis: A review of product properties and effects of pyrolysis parameters,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 57, pp. 1126–1140, May 2016.
- [127] O. Beaumont, “Flash Pyrolysis Products From Beech Wood,” *Wood Fiber Sci.*, vol. 17, no. 2, pp. 228–239, 1985.

- 
- [128] A. L. Sullivan and R. Ball, "Thermal decomposition and combustion chemistry of cellulosic biomass," *Atmos. Environ.*, vol. 47, pp. 133–141, Feb. 2012.
- [129] M. G. Montiano, A. M. Fernández, E. Díaz-Faes, and C. Barriocanal, "Tar from biomass/coal-containing briquettes. Evaluation of PAHs," *Fuel*, vol. 154, pp. 261–267, Aug. 2015.
- [130] T. Kan, V. Strezov, and T. J. Evans, "Lignocellulosic biomass pyrolysis: A review of product properties and effects of pyrolysis parameters," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 57, pp. 1126–1140, May 2016.
- [131] N. Gao, A. Li, C. Quan, L. Du, and Y. Duan, "TG–FTIR and Py–GC/MS analysis on pyrolysis and combustion of pine sawdust," *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, vol. 100, pp. 26–32, Mar. 2013.
- [132] F. Nsaful, F.-X. Collard, M. Carrier, J. F. Görgens, and J. H. Knoetze, "Lignocellulose pyrolysis with condensable volatiles quantification by thermogravimetric analysis—Thermal desorption/gas chromatography–mass spectrometry method," *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, vol. 116, pp. 86–95, Nov. 2015.
- [133] A. Demirbaş, "Mechanisms of liquefaction and pyrolysis reactions of biomass," *Energy Convers. Manag.*, vol. 41, no. 6, pp. 633–646, Apr. 2000.
- [134] D. K. Shen and S. Gu, "The mechanism for thermal decomposition of cellulose and its main products," *Bioresour. Technol.*, vol. 100, no. 24, pp. 6496–6504, Dec. 2009.
- [135] H. Kawamoto, "Lignin pyrolysis reactions," *J. Wood Sci.*, vol. 63, no. 2, pp. 117–132, Apr. 2017.
- [136] L. LI and H. ZHANG, "Preparing Levoglucosan Derived from Waste Material by Pyrolysis," *Energy Sources*, vol. 26, no. 11, pp. 1053–1059, Sep. 2004.
- [137] C. R. Vitasari, G. W. Meindersma, and A. B. de Haan, "Water extraction of pyrolysis oil: The first step for the recovery of renewable chemicals," *Bioresour. Technol.*, vol. 102, no. 14, pp. 7204–7210, Jul. 2011.
- [138] Q. Li, P. H. Steele, F. Yu, B. Mitchell, and E.-B. M. Hassan, "Pyrolytic spray increases levoglucosan production during fast pyrolysis," *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, vol. 100, pp. 33–40, Mar. 2013.
- [139] S. V. Vassilev, D. Baxter, L. K. Andersen, C. G. Vassileva, and T. J. Morgan, "An overview of the organic and inorganic phase composition of biomass," *Fuel*, vol. 94, pp. 1–33, Apr. 2012.
- [140] G. Dobeles *et al.*, "Pre-treatment of biomass with phosphoric acid prior to fast pyrolysis," *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, vol. 68–69, pp. 197–211, Aug. 2003.
- [141] R. L. Johnson *et al.*, "Pyrolysis Gas Chromatography Mass Spectrometry Studies to Evaluate High-Temperature Aqueous Pretreatment as a Way to Modify the Composition of Bio-Oil from Fast Pyrolysis of Wheat Straw," *Energy & Fuels*, vol. 23, no. 12, pp. 6242–6252, Dec. 2009.

- [142] S. V. Vassilev, D. Baxter, L. K. Andersen, and C. G. Vassileva, "An overview of the chemical composition of biomass," *Fuel*, vol. 89, no. 5, pp. 913–933, May 2010.
- [143] G. Xiao *et al.*, "Fluidized-bed pyrolysis of waste bamboo," *J. Zhejiang Univ. A*, vol. 8, no. 9, pp. 1495–1499, Aug. 2007.
- [144] A. Ganesh, "Bamboo Characterization For Thermochemical Conversion And Feasibility Study Of Bamboo Based Gasification And Charcoal Making," Mumbai India, 2003.
- [145] S. García Garrido, *Centrales Termoeléctricas de Biomasa*. Renovetec (España), 2015.
- [146] Bioecomasa, "Tipos de Biomasa," *Bioecomasa*, 2013. [Online]. Available: <https://bioecomasa.wordpress.com/2013/05/24/tipos-de-biomasa/>. [Accessed: 10-Feb-2019].
- [147] J. Mackaluso, "The use of syngas derived from biomass and waste products to produce ethanol and hydrogen," *MMG 445 Basic Biotechnol. eJournal*, vol. 3, no. 1, pp. 98–103, 2007.
- [148] T.B-Reed and A.Das, *Handbook of Biomass Downdraft Gasifier Engine Systems*, no. 1. Golden, Colorado, 1988.
- [149] T.- Kumar-Patra and P. N-Sheth, "Biomass gasification models for downdraft gasifier: A state-of-the-art review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 50, pp. 583–593, 2015.
- [150] C. Higman and M. van der. Burgt, *Gasification 2nd Edition*. Elsevier Science, 2008.
- [151] D. L. Klass, *Biomass for renewable energy, fuels, and chemicals*. Academic Press, 1998.
- [152] Knoef and H.A.M., *Handbook biomass gasification*. BTG Biomass Technology Group, 2005.
- [153] C. Di Blasi, "Combustion and gasification rates of lignocellulosic chars," *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 35, no. 2, pp. 121–140, 2009.
- [154] J. Gil, J. Corella, M. P. Aznar, and M. A. Caballero, "Biomass gasification in atmospheric and bubbling fluidized bed: Effect of the type of gasifying agent on the product distribution," *Biomass and Bioenergy*, vol. 17, no. 5, pp. 389–403, Nov. 1999.
- [155] N. Salami and Z. Skála, "Use of the Steam as Gasifying Agent in Fluidized Bed Gasifier," *Chem. Biochem. Eng. Q. J.*, vol. 29, no. 1, pp. 13–18, 2015.
- [156] P. M. Lv, Z. H. Xiong, J. Chang, C. Z. Wu, Y. Chen, and J. X. Zhu, "An experimental study on biomass air-steam gasification in a fluidized bed," *Bioresour. Technol.*, vol. 95, no. 1, pp. 95–101, 2004.
- [157] P. McKendry, "Energy production from biomass (part 3): gasification technologies," *Bioresour. Technol.*, vol. 83, no. 1, pp. 55–63, May 2002.
- [158] L. E. García, "Obtención de gas combustible a partir de la gasificación de biomasa en un reactor de lecho fijo," *Univ. Nac. Colomb.*, p. 112, 2011.

- [159] Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, *El Gas de madera como combustible para motores*. ROMA: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, 1993.
- [160] National Energy Technology Laboratory- USA, "Commercial Gasifiers." [Online]. Available: <https://www.netl.doe.gov/research/Coal/energy-systems/gasification/gasifipedia/types-gasifiers>. [Accessed: 08-Feb-2019].
- [161] V. Kirubakaran, V. Sivaramakrishnan, R. Nalini, T. Sekar, M. Premalatha, and P. Subramanian, "A review on gasification of biomass," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 13, no. 1, pp. 179–186, 2009.
- [162] M. Barrio, J. E. Hustad, and M. Fossum, "A Small-Scale Stratified Downdraft Gasifier Coupled to a Gas Engine for Combined Heat and Power Production," in *Progress in Thermochemical Biomass Conversion*, Oxford, UK: Blackwell Science Ltd, 2008, pp. 426–440.
- [163] All Power Labs, "Intro - Wood gas, Syngas." [Online]. Available: <http://www.allpowerlabs.com/intro>. [Accessed: 06-May-2019].
- [164] T. B. Reed, B. Levie, M. L. Markson, and M. S. Graboski, "Mathematical Model for Stratified Downdraft Gasifiers.," *ACS Div. Fuel Chem. Prepr.*, vol. 28, no. 5, pp. 410–420, 1983.
- [165] H. LaFontaine and P. Zimmerman, "Construction of a Simplified Wood Gas Generator for Fueling Internal Combustion Engines in a Petroleum Emergency," in *Energy*, 1989, pp. 1–66.
- [166] S. M. Chern, W. P. Walawender, and L. T. Fan, "Mass and energy balance analyses of a downdraft gasifier," *Biomass*, vol. 18, no. 2, pp. 127–151, Jan. 1989.
- [167] R. K. Manurung and A. A. C. M. Beenackers, "Modeling and Simulation of an Open Core Down-Draft Moving Bed Rice Husk Gasifier," in *Advances in Thermochemical Biomass Conversion*, Dordrecht: Springer Netherlands, 1993, pp. 288–309.
- [168] C. Di Blasi, "Dynamic behaviour of stratified downdraft gasifiers," *Chem. Eng. Sci.*, vol. 55, no. 15, pp. 2931–2944, Aug. 2000.
- [169] H. S. Mukunda, S. Dasappa, P. J. Paul, N. K. S. Rajan, and G. Sridhar, "Thermo-Chemical Conversion of Biomass – a Retrospective and a Prospective," no. May 2014, 2001.
- [170] A. Rogel and J. Aguilon, "The 2D Eulerian Approach of Entrained Flow and Temperature in a Biomass Stratified Downdraft Gasifier," *Am. J. Appl. Sci.*, vol. 3, no. 10, pp. 2068–2075, Oct. 2006.
- [171] R. N. Singh, U. Jena, J. B. Patel, and A. M. Sharma, "Feasibility study of cashew nut shells as an open core gasifier feedstock," *Renew. Energy*, vol. 31, no. 4, pp. 481–487, Apr. 2006.
- [172] P. R. Bhoi, R. N. Singh, A. M. Sharma, and S. R. Patel, "Performance evaluation of open core gasifier on multi-fuels," *Biomass and Bioenergy*, vol. 30, no. 6, pp. 575–579, Jun. 2006.

- 
- [173] D. K. Vyas and R. N. Singh, "Feasibility study of Jatropha seed husk as an open core gasifier feedstock," *Renew. Energy*, vol. 32, no. 3, pp. 512–517, Mar. 2007.
- [174] C. Di Blasi and C. Branca, "Modeling a stratified downdraft wood gasifier with primary and secondary air entry," *Fuel*, vol. 104, pp. 847–860, Feb. 2013.
- [175] A. Bhavanam and R. C. Sastry, "Biomass Gasification Processes in Downdraft Fixed Bed Reactors: A Review," *Int. J. Chem. Eng. Appl.*, vol. 2, no. 6, pp. 425–433, 2011.
- [176] P. N. Sheth and B. V. Babu, "Experimental studies on producer gas generation from wood waste in a downdraft biomass gasifier," *Bioresour. Technol.*, vol. 100, no. 12, pp. 3127–3133, 2009.
- [177] Z. . Zainal, R. Ali, C. . Lean, and K. . Seetharamu, "Prediction of Performance of a Downdraft Modeling for Different Biomass Materials," *Energy Convers. Manag.*, vol. 42, pp. 1499–1515, 2001.
- [178] S. Sharma and P. N. Sheth, "Air-steam biomass gasification: Experiments, modeling and simulation," *Energy Conversion and Management*, vol. 110. pp. 307–318, 2016.
- [179] S. Jarunthammachote and A. Dutta, "Thermodynamic equilibrium model and second law analysis of a downdraft waste gasifier," *Energy*, vol. 32, no. 9, pp. 1660–1669, 2007.
- [180] T. B. Reed and M. Markson, "A Predictive Model for Stratified Downdraft Gasification of Biomass," in *Progress in Biomass Conversion*, vol. 4, ACADEMIC PRESS, INC., 1983, pp. 217–254.
- [181] C. A. et. al Estrada, "Gasificación de biomasa para producción de combustibles de bajo poder calorífico y su utilización en generación de potencia y calor," *Sci. Tech.*, no. 25, pp. 155–159, 2004.
- [182] P. Vicente, F. Albersa, and M. Condorí, "Estudio Experimental de Gasificación en un Gasificador Downdraft Prototipo," *Asociación Argentina de Energías Renovables y Medio Ambiente*, vol. 4, Salta- República Argentina, pp. 151–161, 2016.
- [183] A. Kumar, D. D. Jones, and M. A. Hanna, "Thermochemical biomass gasification: A review of the current status of the technology," *Energies*, vol. 2, no. 3, pp. 556–581, 2009.
- [184] N. Couto, A. Rouboa, V. Silva, E. Monteiro, and K. Bouziane, "Influence of the biomass gasification processes on the final composition of syngas," *Energy Procedia*, vol. 36, pp. 596–606, 2013.
- [185] J. C. Lucero Narváz, "Diagnóstico y monitorizado del funcionamiento de motores de combustión alimentados con gas pobre." Repositorio Universidad de Valladolid, Valladolid España, 2016.
- [186] A. V. Bridgwater, "The technical and economic feasibility of biomass gasification for power generation," *Fuel*, vol. 74, no. 5, pp. 631–653, 1995.

- 
- [187] S. Mahapatra, "Experiments and Analysis on Wood Gasification in an Open Top Downdraft Gasifier," Indian Institute of Science -INDIA, 2016.
- [188] H. García, "Modelación de la gasificación de biomasa en un reactor de lecho fijo.," *Fac. Ing. Dep. Ing. Mecánica y Mecatrónica, Univ. Nac. Colomb.*, p. 105., 2013.
- [189] D. A. Agar, M. Rudolfsson, G. Kalén, M. Campargue, D. Da Silva Perez, and S. H. Larsson, "A systematic study of ring-die pellet production from forest and agricultural biomass," *Fuel Process. Technol.*, vol. 180, no. August, pp. 47–55, 2018.
- [190] R. Kulig, "Effects Of Conditioning Methods On Energy Consumption During Pelleting," *Mot. Energ. Roln*, vol. 7, pp. 52–58, 2007.
- [191] Meelko CO., "Maquina Maquina para pellets con madera 200 mm electrica 90-120 kg/h - MKFD200C," *Meelko.com*. [Online]. Available: <http://articulo.meelko.com/483-maquina-para-pellets-con-madera-200-mm-electrica-120-kg-h>. [Accessed: 05-Mar-2019].
- [192] Maquinpro, "Peletizadoras de Producción Ligera," *maquinpro.com*. [Online]. Available: <http://www.maquinpro.com/peletizadoras.html>. [Accessed: 05-Mar-2019].
- [193] S. Dasappa, P. J. Paul, H. S. Mukunda, and U. Shrinivasa, "Wood-char gasification: Experiments and analysis on single particles and packed beds," in *Symposium (International) on Combustion*, 1998, vol. 27, no. 1, pp. 1335–1342.
- [194] E. G. Pereira, J. N. Da Silva, J. L. De Oliveira, and C. S. MacHado, "Sustainable energy: A review of gasification technologies," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 16, no. 7, pp. 4753–4762, 2012.
- [195] A. Anca-Couce, C. Mandl, and I. Obernberger, "Modelling updraft gasification of biomass with a high moisture content : Influence of tar condensation and subsequent reactions," 2015.
- [196] J. Yu and J. D. Smith, "Validation and application of a kinetic model for biomass gasification simulation and optimization in updraft gasifiers," *Chem. Eng. Process. - Process Intensif.*, vol. 125, no. November 2017, pp. 214–226, 2018.
- [197] P. Pradhan, A. Arora, and S. M. Mahajani, "A semi-empirical approach towards predicting producer gas composition in biomass gasification," *Bioresour. Technol.*, vol. 272, no. September 2018, pp. 535–544, 2019.
- [198] M. Simone, F. Barontini, C. Nicolella, and L. Tognotti, "Gasification of pelletized biomass in a pilot scale downdraft gasifier," *Bioresour. Technol.*, vol. 116, pp. 403–412, Jul. 2012.
- [199] X. Zheng, C. Chen, Z. Ying, and B. Wang, "Experimental study on gasification performance of bamboo and PE from municipal solid waste in a bench-scale fixed bed reactor," *Energy Convers. Manag.*, vol. 117, pp. 393–399, 2016.



- 
- [200] GP Green Energy Systems, "Gasification of Bamboo and its Waste," *Akshay Urja*, Mangaldoi, Assam- India, pp. 32–35, 2018.
- [201] ALL Power Labs, "ALL Power Labs," *GASIFIERS*, 2019. [Online]. Available: <http://www.allpowerlabs.com>. [Accessed: 19-Mar-2019].
- [202] D. Martín Pérez, "Diseño de un Gasificador de Pequeña Potencia Eléctrica," Universidad Politécnica de -Catalunya, 2014.
- [203] X. Zheng, C. Chen, Z. Ying, and B. Wang, "Experimental study on gasification performance of bamboo and PE from municipal solid waste in a bench-scale fixed bed reactor," *Energy Convers. Manag.*, vol. 117, pp. 393–399, 2016.
- [204] M. Wasilewski and L. S. Brar, "Effect of the inlet duct angle on the performance of cyclone separators," *Sep. Purif. Technol.*, vol. 213, pp. 19–33, Apr. 2019.
- [205] S. Bernardo, A. P. Peres, and M. Mori, "Computational Study of Cyclone Flow Fluid Dynamics Using a Different Inlet Section Angle," *Rev. Eng. Térmica*, vol. 4, no. 1, pp. 18–23, Aug. 2005.
- [206] F. Qian and Y. Wu, "Effects of the inlet section angle on the separation performance of a cyclone," *Chem. Eng. Res. Des.*, vol. 87, no. 12, pp. 1567–1572, Dec. 2009.
- [207] A. K. Rajvanshi, "Biomass Gasification," in *Alternative Energy in Agriculture*, vol. 2, Maharashtra, India: Nimbkar Agricultural Research Institute, 1986, pp. 83–102.
- [208] J. B. M. D. Arturo, A. E. R. Urrutia, and G. A. U. Cortéz, "Implementación de la tecnología de la gasificación para operar en los beneficio de cafe." pp. 1–111, 2006.
- [209] I. Instituto Nacional Autónomo de Investigaciones Agropecuarias, "Planta Piloto para la Producción De Biocombustibles a partir de la Biomasa Residual," La Concordia -Ecuador, 2009.
- [210] L. S. O. Cantos, E. Á. J. Domínguez, S. M. B. Novillo, J. C. C. Valdiviezo, and G. E. M. Cascante, "Sistema de Filtrado y Enfriamiento de Syngas como Mejora al Proceso de Gasificación Downdraft," *Revista Caribeña de Ciencias Sociales*, Riobamba – Ecuador, 2018.
- [211] L. C. Laurence and D. Ashenafi, "Syngas Treatment Unit for Small Scale Gasification - Application to IC Engine Gas Quality Requirement," *J. Appl. Fluid Mech.*, vol. 5, pp. 95–103, 2012.
- [212] W. Zhang *et al.*, "Gas cleaning strategies for biomass gasification product gas," *Int. J. Low-Carbon Technol.*, vol. 7, no. 2, pp. 69–74, Jun. 2012.
- [213] P. Hasler and T. Nussbaumer, "Gas cleaning for IC engine applications from fixed bed biomass gasification," *Biomass and Bioenergy*, vol. 16, pp. 385–395, Jun. 1999.
- [214] T. B-Reed, "Combustion, Pyrolysis, Gasification, and Liquefaction of Biomass," Golden, CO (United States), Sep. 1980.

- 
- [215] A. Molino, S. Chianese, and D. Musmarra, "Biomass gasification technology: The state of the art overview," *J. Energy Chem.*, vol. 25, no. 1, pp. 10–25, 2016.
- [216] G. S. Ricardo, "Combustión y combustibles," *academia.edu*. pp. 1–23, 2001.
- [217] F. Al-Mansour and J. Zuwala, "An evaluation of biomass co-firing in Europe," *Biomass and Bioenergy*, vol. 34, no. 5, pp. 620–629, 2010.
- [218] J. B. Kandpal and R. C. Maheshwari, "Combustion of biomass fuels in two cookstoves for their conservation," *Energy Convers. Manag.*, vol. 36, no. 10, pp. 1015–1021, 1995.
- [219] D. L. Zambrano Bohórquez, "Concentración de Material Particulado por Combustión de Leña en la Zona Rural del Municipio de Santa Sofía, Boyacá." Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá - Colombia, 2017.
- [220] M. Ezzati and D. M. Kammen, "Household Energy, Indoor Air Pollution, and Health in Developing Countries: Knowledge Base for Effective Interventions," *Annu. Rev. Energy Environ.*, vol. 27, no. 1, pp. 233–270, 2002.
- [221] M. L. Clark *et al.*, "Health and household air pollution from solid fuel use: The need for improved exposure assessment," *Environ. Health Perspect.*, vol. 121, no. 10, pp. 1120–1128, 2013.
- [222] M. A. Jeuland *et al.*, "Preferences for improved cook stoves: Evidence from rural villages in north India," *Energy Econ.*, vol. 52, no. November, pp. 287–298, 2015.
- [223] M. Khandelwal *et al.*, "Why Have Improved Cook-Stove Initiatives in India Failed?," *World Dev.*, vol. 92, pp. 13–27, 2016.
- [224] M. Inayat, S. A. Sulaiman, A. Kumar, and F. M. Guangul, "Effect of fuel particle size and blending ratio on syngas production and performance of co-gasification," *J. Mech. Eng. Sci.*, vol. 10, no. 2, pp. 2188–2200, 2016.
- [225] C. M. Luis Alfredo, H. R. Wilmar Geovany, and G. J. Oscar Javier, "Caracterización de la Guadua Angustifolia Kunth cultivada en Miraflores (Boyacá) de acuerdo con la NSR-10," *Revista Facultad de Ingeniería, UPTC*, vol. 21, no. 33, pp. 53–71, 2012.
- [226] D. A. Perez Ospina, "Diseño de Maquina Lateadora de Guadua." Universidad Javeriana, CALI - COLOMBIA, 2007.
- [227] World Health Organization, *Guidelines for drinking-water quality*, Tercera Ed., vol. 38, no. 3. Geneva 2008, 2008.
- [228] J. Chenoweth, "Minimum water requirement for social and economic development," *Desalination*, vol. 229, pp. 245–256, 2008.
- [229] A. Gandigude and M. Nagarhalli, "Review of Rocket Cook-Stove Geometrical Aspects for its Performance Improvement," *Mater. Today Proc.*, vol. 5, pp. 4743–4747, 2018.

- 
- [230] J. Agenbroad, M. DeFoort, A. Kirkpatrick, and C. Kreutzer, "A simplified model for understanding natural convection driven biomass cooking stoves-Part 1: Setup and baseline validation," *Energy Sustain. Dev.*, vol. 15, pp. 160–168, 2011.
- [231] C. A. Ochieng, C. Tonne, and S. Vardoulakis, "A comparison of fuel use between a low cost, improved wood stove and traditional three-stone stove in rural Kenya," *Biomass and Bioenergy*, vol. 58, pp. 258–266, 2013.
- [232] N. MacCarty, D. Ogle, and D. Still, "A laboratory comparison of the global warming impact of five major types of biomass cooking stoves," *Energy Sustain. Dev.*, vol. 12, no. 2, pp. 56–65, 2008.
- [233] Sean Monkman, "Overview of CarbonCure Masonry Carbonation Technology." CarbonCure Technologies Inc, pp. 1–8, 2016.
- [234] J. G. Jang and H. K. Lee, "Microstructural densification and CO<sub>2</sub> uptake promoted by the carbonation curing of belite-rich Portland cement," *Cem. Concr. Res.*, vol. 82, pp. 50–57, Apr. 2016.
- [235] J. A. Del Real Dávalos, "Influencia del Curado con CO<sub>2</sub> en Mampostería Fabricada con Sistemas Cementantes Ternarios," Universidad Autónoma de Nuevo León - Mexico, 2013.
- [236] R. Kurda, J. de Brito, and J. D. Silvestre, "Carbonation of concrete made with high amount of fly ash and recycled concrete aggregates for utilization of CO<sub>2</sub>," *J. CO<sub>2</sub> Util.*, vol. 29, pp. 12–19, Jan. 2019.
- [237] A. J. Espinoza, "Aptitud de Guadua Angustifolia Kunth en la elaboración de tableros aglomerados con cemento." Universidad Nacional Agraria la Molina, Lima - Perú, pp. 1–116, 2010.
- [238] W. M. Barreto Castillo, "Evaluación de guadua laminada pegada aplicada a propuesta de reticulado plano." Universidad Nacional de Colombia, Bogotá - Colombia, p. 138, 2003.
- [239] S. CASTELANOS and D. GODOY, "Parámetros de Producción y Transformación de la Guadua Laminada Aplicados al Diseño Industrial." Artesanías de Colombia, Bogotá - Colombia, pp. 1–161, 2005.
- [240] R. C. Cajiao, "' Muro panel compuesto en guadua para vivienda ' Modelo experimental de muro panel en guadua para vivienda en la zona cafetera." pp. 1–66, 2017.
- [241] Oscar Fabian Martinez Guerrero, "Nuevo sistema constructivo con corazón de Guadua," *REVISTA M&M*, Bogotá - Colombia, pp. 22–30, 2017.

---

**ANEXOS**

## ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Artículo publicado en la revista Energy Procedia.....	178
Anexo 2. Comunicación para congreso ICEER 2019 (Aveiro, Portugal).....	184
Anexo 3. Resolución otorgamiento de patente modelo de utilidad.....	190
Anexo 4.1. Imágenes ilustrativas del modelo 3D del reactor de gasificación para combustión directa de Guadua Angustifolia.....	194
Anexo 4.2. Imágenes ilustrativas del modelo 3D del sistema de remoción de cenizas del reactor de combustión directa para Guadua Angustifolia. ....	195
Anexo 4.3. Detalles del modelo propuesto para seccionado de Guadua Angustifolia.....	196



4th International Conference on Energy and Environment Research, ICEER 2017, 17-20 July  
2017, Porto, Portugal

## Fast pyrolysis of *Guadua angustifolia*-Kunth

M.B. Folgueras\*, F.J. Fernández, C.R. Ardila, M. Alonso, S. Lage

*Department of Energy, University of Oviedo, School of Mining, Energy and Materials Engineering, Independencia 13, Oviedo 33004, Spain*

---

### Abstract

In this work, the condensable gases of the bio-oil produced from its fast pyrolysis at 500 °C for 30 s has been analyzed by Py-GC/MS. Relatively high yields of acetic acid, phenolics and levoglucosan have been found. Levoglucosan can be used as a source for synthesizing bio-fuels and both, phenolics and levoglucosan in the production of chemicals. However, further research is necessary in order to find adequate ways of using the great potential of this type of lignocellulosic biomass for developing a bio-based economy less dependent on fossil fuels and more respectful with the environment.

© 2017 The Authors. Published by Elsevier Ltd.

Peer-review under responsibility of the scientific committee of the 4th International Conference on Energy and Environment Research.

*Keywords:* Guadua; pyrolysis; bio-oil; Py-GC/MS

---

### 1. Introduction

Bamboos are widely spread throughout the subtropical and tropical regions of the world [1]. In Colombia, there is an area of 510 km<sup>2</sup> of forest dominated by the bamboo species *Guadua angustifolia* [2]. Bamboo has the capacity to capture CO<sub>2</sub> quickly due to its rapid growth and it also has multiple uses that include bioremediation, wood, textile and paper industries and the bioenergy industry [2]. Thus, apart from the availability of the natural resource, there is a lot of waste from the non-energetic uses of bamboo that can be used for producing biofuels.

Nowadays, humankind has to face up to the global warming, but without forgoing progress and development. The partial substitution of oil products by those from biomass pyrolysis can contribute to reduce CO<sub>2</sub> emissions, since

---

\* Corresponding author. Tel.: +34-985104326; fax: +34-985104322.

*E-mail address:* belenfd@uniovi.es

bio-oils can replace oil based-fuels in combustion devices, such as boilers, furnaces, diesel engines and gas turbines, or can be used for producing a wide variety of chemicals (biorefinery) [3]. When the objective of biomass pyrolysis is to obtain bio-oil (liquid), high heating rates and short residence times are applied, and this is known as fast pyrolysis. Accordingly, the liquid bio-oil from the fast pyrolysis of *Guadua angustifolia*-Kunth can be an alternative fuel that partially substitutes conventional fuels derived from crude oil. Since the composition of bio-oil depends to a great degree on the characteristics of the raw material and on the reaction conditions and since the energetic use of this type of bamboo has been scarcely studied [1], the objective of this communication is to evaluate the composition of the bio-oil obtained from *Guadua angustifolia*-Kunth.

## 2. Materials and methods

Samples of *Guadua angustifolia*-Kunth from Colombia were ground to a size smaller than 800  $\mu\text{m}$  and it was characterized by ultimate and proximate analyses. Proximate analysis were carried out according to the UNE-EN standards for solid biofuels, UNE-EN ISO 18134-3, UNE-EN ISO 18122 and UNE-EN ISO 18123 for moisture content, ash and volatile matter yields, respectively. Carbon, hydrogen, nitrogen and sulphur were analyzed with an Elementar vario Macro analyzer. The samples underwent fast pyrolysis in a helium atmosphere at a temperature of 500  $^{\circ}\text{C}$  for 30 seconds. The compounds in the bio-oil that was produced were identified by quantitative Pyrolysis Gas Chromatography – Mass Spectrometry (Py-GC/MS). Py-GC/MS was performed using a PY-2020iD Double Shot Pyrolyser from Frontier Laboratories coupled to a GCMS-QP2010Plus from Shimadzu, equipped with a DB-5ms column (0.25 mm i.d.; 30 m length; 0.25  $\mu\text{m}$  film thickness). The temperature of the column was kept at 40  $^{\circ}\text{C}$  for 2 min, then raised to 300  $^{\circ}\text{C}$  at a rate of 5  $^{\circ}\text{C}/\text{min}$  and held for 15 min. Mass Spectrometry (MS) was operated in full scan mode (43 – 600 m/z).

## 3. Results and discussion

The proximate and ultimate analyses of *Guadua*, which is a perennial woody grass, are shown in Table 1. According to Salas-Enriquez et al. [2] it has the following lignocellulosic analysis: 47.12 wt.% of cellulose, 18.21 wt.% of hemicellulose and 22.76 wt.% of lignin, which is relatively similar to that of some woody biomass such as pine [4]. It has a slightly lower content of cellulose than pine (48.1 wt.%) and a higher content than both pine sawdust (45.9 wt.%) and the mean for grasses (42.7 wt.%) [4].

Table 1. Proximate and ultimate analyses of *Guadua angustifolia*-Kunth.

Analysis	<i>Guadua</i>
Moisture (wt.%, ad)	7.8
Proximate analysis (wt.%, db)	
Volatile matter	75.8
Ash	3.8
Fixed carbon <sup>a</sup>	20.4
Ultimate analysis (wt.%, db)	
C	47.9
H	6.7
N	0.5
S	0.7
O <sup>a</sup>	40.4

<sup>a</sup> By difference

In Fig. 1, the total ion count (TIC) of evolved gases from *Guadua* pyrolysis against the retention time expressed in min ( $t_R$ ) is depicted.

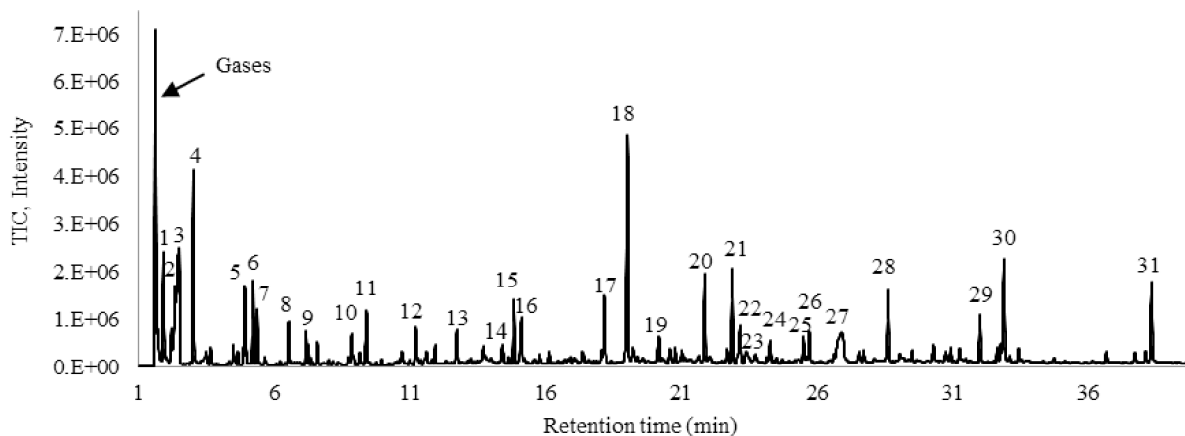


Fig. 1. TIC obtained by Py-GC/MS of *Guadua angustifolia*-Kunth.

Table 2 shows the most likelihood compounds as identified by Py-GC/MS of *Guadua angustifolia*-Kunth, as well as the TIC peak number (Fig. 1), the time of retention ( $t_R$ ) and the area of the corresponding peak. The 31 peaks shown in Table 2 are those whose areas are higher than 0.70% of the total area and the total sum of the peak areas represents 70% of the volatile matter released during the pyrolysis of *Guadua*.

Table 2 shows that the bio-oil contains several types of oxygenated organic compounds, that include aldehydes, ketones, esters, acids, alcohols, heterocyclic organic compounds, aromatics and an anhydrous sugar (levoglucosan). The boiling points of these compounds range from 31.8 °C for methyl formate (2) to 384 °C for levoglucosan (27). The high presence of oxygen in bio-oils is the main difference between them and conventional liquid fuels derived from oil [5]. From the compounds indicated in Table 2, aromatics represent the 46.2%, most of them being phenolics. These phenolics come from the thermal cracking of lignin, which is a cross-linked phenolic polymer [6], the phenolic structure being repeated many times in the molecule. Although different types of aromatics were identified in the bio-oil, polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) were not seen, due probably to the fact that the pyrolysis temperature was not high enough. PAHs are usually formed from incomplete combustion or pyrolysis of organic matter and have potential carcinogenic, mutagenic and genotoxic effects [7]. They are generally formed when temperatures exceed 700 °C [3]. The compounds associated with the peak numbers 3, 6, 7, 8, 13, 15, 16, 20, 24, 26 and 30 in Table 2 were also found by Gao et al. [8] after pine sawdust pyrolysis at 600 °C.

Table 2 shows that, in the bio-oil from *Guadua* pyrolysis, the most important compounds are acetic acid (3), coumaran (18), hydroxyacetone (4), coniferyl alcohol (30), levoglucosan (27) and acetylformaldehyde (1). From both types of biomass (pine sawdust and *Guadua*), a high proportion of acetic acid is formed. Nsaful et al. [9] also found high yields of acetic acid from the slow pyrolysis of another type of bamboo (*Bambusa balcoa*) at 600 °C in comparison with those of pine and two corn residues. Acetic acid comes from xylose, a monosaccharide of hemicellulose, which undergoes cleavage of the acetyl groups as a result of the thermal decomposition [10]. Collard et al. [11] have reported that acetic acid also comes from lignin and cellulose pyrolysis, which would explain the high yield of this compound. The presence of this carboxylic acid is undesirable and makes the bio-oil potentially corrosive [3]. Coumaran is a benzofuran that is derived from the holocellulose, i.e. from *Guadua* carbohydrates that are in cellulose and hemicellulose. The presence of levoglucosan, which is formed by the depolymerization of cellulose [3,12], must be noticed. The relatively high proportion of this compound is related to the short residence time, since it acts as an intermediate in the formation of other compounds that are characteristic of cellulose decomposition. Some authors [12] have reported that its yield depends on the source of cellulose and on the pyrolysis conditions, the yield being increased by lower temperatures and/or higher heating rates. Hydroxyacetone is mainly produced from direct cellulose decomposition and secondarily from that of levoglucosan, whilst acetylformaldehyde is mainly produced by the secondary decomposition of levoglucosan [12]. Coniferyl alcohol and other compounds such as vanillin and phenol, 4-ethenyl-2-methoxy- are formed in the primary pyrolysis of lignin that occurs at temperatures below 400 °C and at which aromatic methoxy groups are stable [13].

Table 2. Main condensable gases obtained from *Guadua angustifolia*-Kunth pyrolysis at 500 °C for 30 s.

Peak number	t <sub>R</sub> (min)	Peak area (%)	Compound	Molecular formula
1	1.917	3.33	Acetylformaldehyde	C3H4O2
2	2.212	1.02	Methyl formate	C2H4O2
3	2.517	10.08	Acetic acid	C2H4O2
4	3.022	4.25	Hydroxyacetone	C3H6O2
5	4.927	2.11	Glycolic acid, acetate; 2(5H)-Furanone	C4H6O4; C4H4O2
6	5.216	2.06	Succinaldehyde	C4H6O2
7	5.368	1.15	Acetic anhydride	C4H6O3
8	6.540	1.08	Furfural	C5H4O2
9	7.172	0.82	Furfuryl alcohol	C5H6O2
10	8.860	0.90	2(5H)-Furanone	C4H4O2
11	9.400	1.83	1,2-Cyclopentanedione	C5H6O2
12	11.215	1.29	Phenol	C6H6O
13	12.739	1.05	1,2-Cyclopentanedione, 3-methyl	C6H8O2
14	14.410	0.75	Phenol, 3-methyl-	C7H8O
15	14.828	1.73	Phenol, 2-methoxy-	C7H8O2
16	15.106	1.68	Cyclobutanol	C4H8O
17	18.169	2.09	Phenol, 2-ethoxy-	C8H10O2
18	19.013	8.17	Coumaran	C8H8O
19	20.163	0.92	4-Methylcatechol; Pyrocatechol, 3-methoxy-	C7H8O2; C7H8O3
20	21.861	2.55	Phenol, 4-ethenyl-2-methoxy-	C9H10O2
21	22.880	2.89	Phenol, 3,4-dimethoxy-	C8H10O3
22	23.168	1.36	Benzaldehyde, 3-hydroxy-	C7H6O2
23	23.385	0.77	1,2,3-Benzenetriol; 1,2,4-Benzenetriol	C6H6O3; C6H6O3
24	24.278	0.78	Vanillin	C8H8O3
25	25.505	0.73	1,2,4-Trimethoxybenzene	C9H12O3
26	25.714	0.86	Phenol, 2-methoxy-4-(1-propenyl)	C10H12O2
27	26.915	3.54	Levoglucosan	C6H10O5
28	28.618	2.31	3,5-Dimethoxyacetophenone	C10H12O3
29	31.989	1.46	Phenol, 2,6-dimethoxy-4-(2-propenyl)-	C11H14O3
30	32.889	3.69	Coniferyl alcohol	C10H12O3
31	38.331	2.74	2,5-Dimethoxybenzyl acetate	C11H14O4

Levoglucosan, which is an anhydrosugar produced by the polysaccharide depolymerisation, can be hydrolysed to glucose in order to obtain bio-ethanol. It can also be used in the synthesis of oligosaccharides or the manufacture of pharmaceutical and other related materials [14]. Vitasari et al. [15] studied forest residue-derived and pine-derived pyrolysis oils that were produced by fast pyrolysis at 520 °C with a residence time of 1 s whose levoglucosan contents were 1.7 and 1.6 wt.%, respectively. In general, without feedstock pre-treatment, fast pyrolysis oil contains around 3 wt.% of levoglucosan [16]. Gao et al. [8], after pine sawdust pyrolysis at 600 °C, do not find levoglucosan among the main 35 compounds identified in the bio-oil. On the other hand, Li and Zhang [14] reported maximum levoglucosan yields of 19 and 37 wt.% in the bio-oil from pyrolysis at 420 °C of waste newspaper and waste cotton without pre-treatment. In the case of the cotton waste, the high levoglucosan yield may be associated with the fact that this type of material has a very high cellulose content, around 80 wt.% [4]. Several authors [17,18] have pointed out that, applying an adequate treatment prior to fast pyrolysis, the yield of levoglucosan can be increased



substantially. Johnson et al. [18] found that the ratios levoglucosan/acetic acid and levoglucosan/furfural in the bio-oil obtained from fast pyrolysis of wheat straw increased approximately from 1 to 18 and from 7 to 28, respectively, when the pre-treatment temperature of the wheat straw with hot water was increased from 175 to 260 °C. As levoglucosan yield after fast pyrolysis very much depends on the feedstock, finding a suitable one that favours the formation of levoglucosan without a pre-treatment is of interest, since the pre-treatment adds complexity and makes the global process more expensive. From the fast pyrolysis of *Guadua*, relatively high proportions of levoglucosan were obtained, the ratios levoglucosan/acetic acid and levoglucosan/furfural being around 0.35 and 3.3, respectively. However, Nsaful et al. [9] found much lower levoglucosan yield from the slow pyrolysis up to 600 °C of *Bambusa balcooa*, a type of bamboo, compared to pine, corn cob and corn stover, these being 0.09, 2.1, 0.26 and 0.23 wt.% dry biomass, respectively. They concluded that levoglucosan yields increase with the initial content of C6 sugars, the reason why pine, corn cob and corn stover produce higher levoglucosan yields than *Bambusa balcooa* [9]. Moreover, among the ashes of 86 varieties of biomass, bamboo ash has very high contents of K<sub>2</sub>O (53.38 wt.%) only surpassed by almond hulls and shells (63.90 and 53.48 wt.%, respectively), the mean values for natural biomass being 19.40 wt.% [19]. This is in good agreement with the fact that biomass with a rapid annual growth is enriched in alkaline elements because they are taken up from the soil [19]. *Guadua* ash has a very high potassium content [1], much higher than those of wood and coal, and alkalines are strong catalysts of cellulose fragmentation reactions that results in the formation of hydroxyl acetyl aldehyde, favouring them over depolymerization reactions that lead to the formation of levoglucosan [18]. In spite of the fact that *Guadua* has a high potassium content, its fast pyrolysis yields relatively high proportions of levoglucosan. However, it must be pointed out that not only the pyrolysis temperature, but also the residence time and the mineral matter and its composition influence the bio-oil composition.

#### 4. Conclusion

The composition of the bio-oil obtained from the fast pyrolysis at 500 °C for 30 s of *Guadua angustifolia*-Kunth has been analyzed in order to determine its suitability as a resource for producing bio-fuels or bio-chemicals. The bio-oil contains aldehydes, ketones, esters, acids, alcohols, heterocyclic organic compounds, aromatics and levoglucosan, the concentration of phenolics being especially noticeable. *Guadua* pyrolysis yields relatively high contents of levoglucosan in spite of the fact that its ash is enriched in potassium that generally limits levoglucosan production and no pre-treatment was applied prior to the pyrolysis. This may be related to the high cellulose content of the *Guadua* and the conditions of the thermochemical process, but more research effort should be invested in this topic. The phenolic fraction of bio-oil can be used for the production of phenol-formaldehyde synthetic resins and other materials and levoglucosan can be used for the production of bio-ethanol, pharmaceutical and other related materials. Thus, the fast growth of *Guadua* and its high availability, together with the fact that it is a non-feed type of biomass makes this perennial woody grass an interesting candidate for producing bio-fuels and value-added chemicals, thus contributing to reducing our dependence on fossil fuels.

#### References

- [1] Fryda, Lydia, Claudia Daza, Jan Pels, Arno Janssen, and Robin Zwart. (2014) "Lab-scale co-firing of virgin and torrefied bamboo species *Guadua angustifolia* Kunth as a fuel substitute in coal fired power plants." *Biomass and Bioenergy* 65 (2014): 28-41.
- [2] Salas-Enríquez, Biana G., Aidé M. Torres-Huerta, Eloy Conde-Barajas, Miguel A. Domínguez-Crespo, Leonardo Díaz-García, and M<sup>a</sup> de la Luz X. Negrete-Rodríguez. (2016) "Activated carbon production from the *Guadua amplexifolia* using a combination of physical and chemical activation." *Journal of Thermal Analysis Calorimetry* 124 (2016): 1383-1398.
- [3] Kan, Tao, Vladimir Strezov, and Tim J. Evans. (2016) "Lignocellulosic biomass pyrolysis: A review of product properties and effects of pyrolysis parameters." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 57 (2016): 1126-1140.
- [4] Vassilev, Stanislav V., David Baxter, Lars K. Andersen, Christina G. Vassileva, and Trevor J. Morgan. (2012) "An overview of the organic and inorganic phase composition of biomass." *Fuel* 94 (2012): 1-33.
- [5] Mohan, Dinesh, Charles U. Pittman Jr., and Philip H. Steele. (2006) "Pyrolysis of wood/biomass for bio-oil: a critical review." *Energy & Fuels* 20.3 (2006): 848-889.
- [6] Sullivan, Andrew L., and Rowena Ball. (2012) "Thermal decomposition and combustion chemistry of cellulosic biomass." *Atmospheric Environment* 47 (2012): 133-141.

- [7] Montiano, M. Garabandal, Ana M. Fernández, Elvira Díaz-Faes, and Carmen Barriocanal. (2015) “Tar from biomass/coal-containing briquettes. Evaluation of PAHs.” *Fuel* 154 (2015): 261-267.
- [8] Gao, Ningbo, Aimin Li, Cui Quan, Lin Du, and Yue Duan. (2013) “TG-FTIR and Py-GC/MS analysis on pyrolysis and combustion of pine sawdust.” *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 100 (2013): 26-32.
- [9] Nasaful, Frank, François-Xavier Collard, Marion Carrier, Johann F. Görgens, and Johannes H. Knoetze. (2015) “Lignocellulose pyrolysis with condensable volatiles quantification by thermogravimetric analysis – Thermal desorption/gas chromatography-mass spectrometry method.” *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 116 (2015): 86-95.
- [10] Demirbas, Ayhan. (2000) “Mechanisms of liquefaction and pyrolysis reactions of biomass.” *Energy Conversion and Management* 41 (2000): 633-646.
- [11] Collard, François X., Jöel Blin, Ammar Bensakhria, and Jérémy Valette. (2012) “Influence of impregnated metal on the pyrolysis conversion of biomass constituents.” *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 95 (2012): 213-226.
- [12] Shen, Dekui, and Sai Gu. (2009) “The mechanism for thermal decomposition of cellulose and its main products.” *Bioresource Technology* 100 (2009): 6496-6504.
- [13] Kawamoto, Haruo. (2017) “Lignin pyrolysis reactions.” *Journal of Wood Science* (2017): 1-16.
- [14] Li, Lin, and Hongxun Zhang. (2004) “Preparing Levoglucosan Derived from Waste Material by Pyrolysis.” *Energy Sources* 26 (2004): 1053-1059.
- [15] Vitasari, Caecilia R., G. Wytze Meindersma, and André B. de Haan. (2011) “Water extraction of pyrolysis oil: The first step for the recovery of renewable chemicals.” *Bioresource Technology* 102 (2011): 7204-7210.
- [16] Li, Qi, Philip H. Steele, Fei Yu, Brian Mitchell, and El-Barbary M. Hassana. (2013) “Pyrolytic spray increases levoglucosan production during fast pyrolysis.” *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 100 (2013): 33-40.
- [17] Dobelev, Galina V., Tatiana Dizhbite, Galina Rossinskaja, Galina M. Telysheva, Dietrich Meier, Silke Radtke, and Oskar P. Faix. (2003) “Pre-treatment of biomass with phosphoric acid prior to fast pyrolysis. A promising method for obtaining 1,6- anhydrosaccharides in high yields.” *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 68-69 (2003): 197-211.
- [18] Johnson, Robert L., Shi-Shen Liaw, Manuel Garcia-Perez, Su Ha, Sean S.-Y. Lin, Armando G. McDonald, and Shulin Chen. (2009) “Pyrolysis gas chromatography mass spectrometry studies to evaluate high-temperature aqueous pretreatment as a way to modify the composition of bio-oil from fast pyrolysis of wheat straw.” *Energy and Fuels* 23 (2009): 6242–6252.
- [19] Vassilev, Stanislav V., David Baxter, Lars K. Andersen, and Christina G. Vassileva. (2010) “An overview of the chemical composition of biomass.” *Fuel* 89 (2010): 913-933.

## OXIDATIVE PYROLYSIS OF GUADUA ANGUSTIFOLIA KUNTH

C.R. Ardila<sup>1,2</sup>, M.B. Folgueras<sup>1</sup> and F.J. Fernández<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Department of Energy, University of Oviedo, School of Mining, Energy and Materials Engineering, Independencia 13, Oviedo 33004, Spain, [uo233576@uniovi.es](mailto:uo233576@uniovi.es) (C.R. Ardila), [belenfd@uniovi.es](mailto:belenfd@uniovi.es) (M.B. Folgueras)

<sup>2</sup> Department of Energy, University of Oviedo, Polytechnic School of Engineering, Wifredo Ricart s/n, Gijón 33204, Spain, [javierfernandez@uniovi.es](mailto:javierfernandez@uniovi.es)

### ABSTRACT

This is a study of the behavior of the species of bamboo *Guadua angustifolia* Kunth during oxidative pyrolysis. Thus, thermogravimetric analysis of *Guadua* combustion in an oxygen flow rate of 50 cm<sup>3</sup>/min and at a heating rate of 10 °C/min was carried out. Moreover, the combustion profile was compared with the pyrolysis profile of *Guadua* in nitrogen, using the same flow rate and the same heating rate. For this type of bamboo, devolatilization during combustion (oxidative pyrolysis) is boosted by the heterogeneous oxidation of the pyrolyzable fraction of this material. Therefore, the emission of volatiles is highly accelerated. This fact may be due to both the use of an oxygen flow and the inorganic composition of *Guadua*, which contains high concentrations of potassium. This potassium may act as a catalyst that weakens organic matter bonds by an oxygen transfer mechanism. This behavior is not observed for all types of biomass. Therefore, it is likely that inorganic matter of biomass plays an important role in the way its oxidation occurs, which has a significant influence on the choice of the most suitable process for its valorization.

**Keywords:** *Guadua angustifolia* Kunth, thermogravimetric analysis, oxidative pyrolysis, inert pyrolysis, potassium.

### 1. INTRODUCTION

Colombia is the Latin America country with the second greatest level of bamboo diversity. It has 24 endemic species of this large woody grass that includes *Guadua angustifolia* Kunth (Espinosa-Pérez, 2004). *Guadua* covers an area of 51500 ha of which almost 90% is wild and the rest has been cultivated (Riaño et al., 2002). Nowadays, bamboo has attracted major international interest, which is why Colombia may intensify its production in order to increase exportation. The great interest that it has awakened is related to the fact that *Guadua* has ideal physico-chemical characteristics for its use in the construction industry, furniture, paper, textile, food and chemical industries and handicrafts (Londoño, 2011) (Rodríguez et al., 2006). Additionally, it is a type of biomass with rapid growth and great adaptability to different terrains and it is a crop which needs little maintenance. *Guadua* has also a regenerative mechanism of self-propagation that guarantees its supply (Londoño, 2011). Thus, its cultivation may constitute a natural and efficient system for fixing large amounts of CO<sub>2</sub>. However, an uncontrolled spread of *Guadua* may have a negative impact on bio-diversity and, consequently, on the environment, one reason why an adequate balance should be sought.

Another less studied application of *Guadua* is as an energy source (Fryda et al., 2014) or as a source for obtaining valuable liquid or solid fractions (Folgueras et al., 2017) (Salas-Enriquez et al., 2016). In order to take advantage of its energy potential, *Guadua* can be treated using thermochemical processes (combustion, pyrolysis and gasification). Thus, this natural resource may be converted into a value energy source for isolated rural communities in Colombia. Both pyrolysis and combustion are included among the stages of gasification, which is why knowledge of these processes is important in order to optimize the whole process. Accordingly, the aim of this



paper is to deepen knowledge of the behaviour of *Guadua* during oxidative pyrolysis in comparison with its inert pyrolysis and the influence of its chemical composition on this behaviour.

## 2. MATERIALS AND METHODS

The material used in this research is bamboo of the species *Guadua angustifolia* Kunth from the coffee region of Colombia. The samples of *Guadua* culm were crushed and sieved to a size lower than 800  $\mu\text{m}$ . The proximate analysis was carried out according to the standards for solid biofuels UNE-EN ISO 18134-3, UNE-EN 18123, UNE-EN ISO 18122, for moisture, volatile matter and ash, respectively. Carbon, hydrogen, nitrogen and sulphur were analysed with a Macro Elementar Vario. Its lignocellulosic composition was determined according to the standard TAPPI T222 om-15, while major (Al, Ca, Fe, Mg, P, K, Si, Na, Ti) and minor (As, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Mn, Mo, Ni, Pb, Sb, V, Zn) element concentrations were determined according to the standards UNE-EN ISO 16967 and UNE-EN ISO 16968, respectively. Higher heating value was determined using an analytical balance Mettler Toledo model AB 204SNR 111660708 and a calorimeter IKA C 2000 Basic S1. Thermogravimetric analyses (TGs) were carried out with a Mettler-Toledo TGA / SDTA851e, using both nitrogen and oxygen flow rates of 50  $\text{cm}^3/\text{min}$ . For both profiles (pyrolysis and combustion), the samples were heated from the ambient temperature to 800  $^\circ\text{C}$  at a heating rate of 10  $^\circ\text{C}/\text{min}$ .

## 3. RESULTS AND DISCUSSION

### 3.1. Characterization of *Guadua*

Table 1 shows the proximate and ultimate analysis, higher heating value (HHV) and lignocellulosic composition of *Guadua angustifolia* Kunth and its comparison with other species of bamboo. The bamboos shown in Table 1 came from Mexico (*Guadua amplexifolia* and five species of *Bambusa* and *Dendrocalamus*) (Salas-Enríquez et al., 2016) (Salovaara et al., 2015), Japan and China (*Phyllostachys*) (Scurlock et al., 2000), Southeast Asian rainforest (*Bambusa Tulda*) (Dutta et al., 2014) and Taiwan (*Dendrocalamus latiflorus* Munro) (Lu and Chen, 2015). Table 1 shows that the differences among the species of bamboos are not significant. Proximate analysis of *Guadua* is intermediate among the types of bamboos indicated in Table 1. With regard to the ultimate analysis, the concentration of sulphur is higher in both species of bamboo of the genus *Guadua*, whilst the species *Bambusa Tulda* has the highest concentration of nitrogen (Table 1). Sulphur concentration in *Guadua* is higher than the mean value for herbaceous and agricultural biomass and natural biomass, being 0.14 wt.% (db) and 0.19 wt.% (db) respectively (Vassilev et al., 2010). Differing from the rest of the species of Table 1, *Guadua angustifolia* Kunth has higher concentrations of lignin than hemicellulose. This result agrees with that obtained by Salas-Enríquez et al. (Salas-Enríquez et al., 2016). In comparison with the mean values for natural biomass (43.3 wt.% daf of cellulose, 31.8 wt.% daf of hemicellulose and 24.9 wt.% daf of lignin) (Vassilev et al., 2012), bamboo has higher concentrations of cellulose and lignin.

Table 2 shows the concentrations of major and minor elements in *Guadua*. As can be seen in Table 2, the concentration of K is very high in comparison with the rest of elements. This is typical of fast growing plants, such as grasses, and a significant part of it is probably contained in water-soluble salts (Vassilev et al., 2012). The water soluble salts are normally highly mobile and reactive and have low decomposition and melting temperatures during thermal processes (Vassilev et al., 2012). Moreover, these inorganic compounds may have a catalytic effect on pyrolysis and combustion (Vassilev et al., 2012). This has to be taken into account for choosing the best way of valorizing this type of biomass.

Table 1. Characterization of bamboo *G. angustifolia* Kunth and comparison with other species. Contents of cellulose, hemicellulose and lignin are expressed on dry ash-free basis and normalized to 100.0%.

Analysis	<i>Guadua Angustifolia Kunth</i>	<i>Guadua amplexifolia</i> <sup>c</sup>	<i>Phyllostachys</i> <sup>d</sup>	<i>Bambusa Tulda</i> <sup>e</sup>	<i>Dendrocalamus latiflorus</i> Munro <sup>f</sup>	<i>Bambusa</i> and <i>Dendrocalamus</i> <sup>g</sup>
Moisture [wt%, ad]	7.8 <sup>b</sup>	8.1			3.6	
Proximate analysis [wt%, db]						
Volatile matter	75.8 <sup>b</sup>	86.8	80.0 – 83.7	80.0	69.5	75.9 – 79.1
Ash	3.8 <sup>b</sup>	2.2	0.5 – 1.3	4.5	4.1	3.3 – 5.2
Fixed carbon <sup>a</sup>	20.4 <sup>b</sup>	10.9	15.9 – 18.8	15.2	26.4	17.5 – 19.3
HHV [MJ/kg, db]						
	19.1 <sup>b</sup>	n.a.	19.1 – 19.6	18.4	17.1	18.2 – 18.5
Ultimate analysis [wt%, db]						
C	47.9 <sup>b</sup>	42.7	50.9 – 52.3	47.9	n.a.	45.9 – 47.0
H	6.7 <sup>b</sup>	6.1	4.5 – 5.4	6.5	n.a.	5.8 – 6.1
N	0.5 <sup>b</sup>	0.8	0.2 – 0.6	2.8	n.a.	0.12 – 0.15
S	0.7 <sup>b</sup>	0.8	0.03 – 0.05	n.a.	n.a.	0.05
O <sup>a</sup>	40.4 <sup>b</sup>	47.4	41.1 – 42.9	38.3	n.a.	43.1 – 43.8
Structural components [wt%, daf]						
Cellulose	52.6	50.1	44.2 – 47.7	n.a.	57.8	n.a.
Hemicellulose	19.7	27.5	26.7 – 28.6	n.a.	23.8	n.a.
Lignin	27.6	22.4	25.4 – 27.3	n.a.	18.4	n.a.
Extractives	7.3	n.a.	3.5 – 4.7	n.a.	n.a.	n.a.

<sup>a</sup> By difference <sup>b</sup> (Folgueras et al., 2017) <sup>c</sup> (Salas-Enríquez et al., 2016) <sup>d</sup> (Scurlock et al., 2000) <sup>e</sup> (Dutta et al., 2014) <sup>f</sup> (Lu and Chen, 2015) <sup>g</sup> (Salovaara et al., 2015)  
n.a. not available

Table 2. Concentrations of major and minor elements of bamboo *G. angustifolia* Kunth

Major elements	[ppm, ad]	Minor elements	[ppm, ad]
Al	18.1	As	< 1.0
Ba	5.26	Mn	2.72
Ca	25.1	Cd	< 0.5
Fe	16.4	Cu	3.13
Mg	46.2	Cr	< 1.0
K	5229	Ni	< 1.0
Si	234	Pb	< 1.0
Na	584	Cu	< 1.0
Ti	< 1.0	Mo	< 1.0
P	164	Sb	< 1.0
		V	< 1.0
		Zn	11.7

### 3.2. Thermogravimetric analysis of *Guadua*

Fig. 1 shows the comparison of the derivative thermogravimetric curves (DTGs) and differential thermal analysis (DTA) of the pyrolysis and combustion of *Guadua*. Moreover, in Table 3, the mass losses for several intervals of these processes are indicated. In both processes, from 25 to 209 C, the mass loss (8.1 wt.%) is mainly due to the vaporization of moisture in the sample (7.8 wt.%, ad). For pyrolysis and combustion, the temperatures for which maximum mass loss rate occur are 330 C and 285 C, respectively. During the pyrolysis of *Guadua* between 209 and 330 C, there is a loss of volatile matter (36.3 wt.%) approximately equal to that of the interval 209 – 285 C of combustion (37.5 wt.%). This mass loss is due to the total decomposition of hemicellulose, partial of cellulose and slight decomposition of lignin, whose intervals of decomposition during pyrolysis at 10 C/min are 220 C – 315 C, 315 C – 400 C and 160 C – 900 C, respectively (Yang et al., 2007). Therefore, the devolatilization process of combustion is accelerated with respect to that of pyrolysis. During combustion, the maximum mass loss rate is  $3.84 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ , whilst during pyrolysis it is  $1.17 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$  (Fig. 1a). In the range of temperatures 285 – 315 C of the combustion process (from the maximum of the peak to the beginning of the shoulder), the mass loss is 29.0 wt.%, very similar to that of the interval 330 – 600 C of *Guadua* pyrolysis. For this interval, the mass loss can

be attributed to partial decomposition of cellulose and lignin. Again, this devolatilization occurs at a higher rate during combustion than during pyrolysis. Thus, from 209 to 315 °C of *Guadua* combustion, oxidative pyrolysis occurs, the total mass lost being 66.5 wt.%, which roughly corresponds to the volatile matter of the sample (69.9 wt.%, ad). During combustion, from the beginning of the shoulder (315 °C) to 333 °C, the mass loss is 18.1 wt%, which is approximately equal to the fixed carbon (18.8 wt%, ad). Thus, *Guadua* combustion can be divided into four main stages, each dominated by the following processes: 1) moisture removal from 25 to 209 °C; 2) oxidative pyrolysis (devolatilization + volatile combustion) from 209 to 315 °C; 3) char combustion from 315 to 333 °C and 4) inorganic matter transformation from 333 to 800 °C.

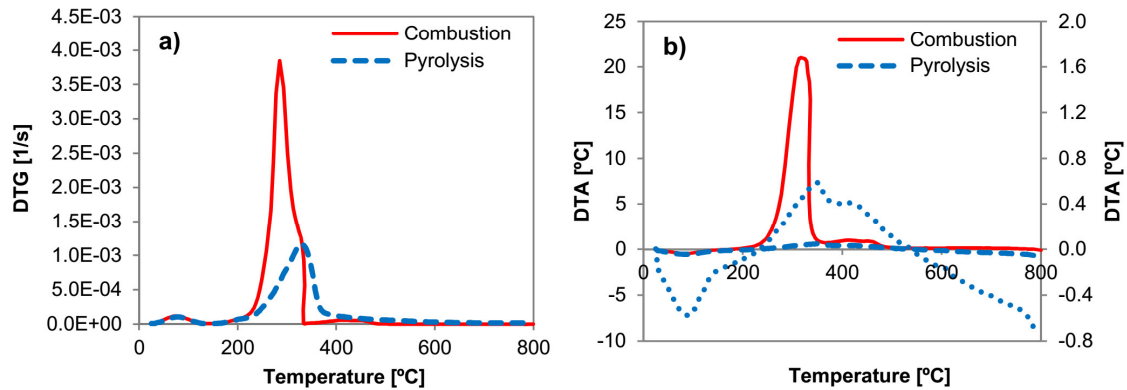


Fig. 1. DTG and DTA curves of pyrolysis and combustion of *Guadua*

Fig. 1b shows the DTA of the combustion and pyrolysis of *Guadua*. The dotted line of Fig. 1b corresponds to pyrolysis, its vertical axis being the one on the right side. DTA pyrolysis of *Guadua* is also plotted with the scale of the left vertical side (dashed line) in order to be compared with *Guadua* combustion. DTA of combustion shows two clear exothermic stages, the first one from 200 °C to 340 °C (highly exothermic) and the second one from 340 °C to 500 °C. DTA of *Guadua* pyrolysis shows an endothermic peak from 25 °C to 237 °C (mainly moisture and volatile extractives removal), an exothermic peak from 237 °C to 533 °C (mainly hemicellulose and cellulose decomposition) and an endothermic stage from 533 °C to 800 °C (probably the last stage of lignin degradation and other secondary reactions that causes char). For bamboo pyrolysis at a heating rate of 10 °C/min, Oyedun et al. (Oyedun et al., 2013) found an exothermic peak in the range 350 °C – 450 °C. The exothermic peak found during bamboo pyrolysis is probably due to the heterogeneous secondary reactions of the volatiles, which also cause the formation of char (Anca-Couce and Scharler, 2017).

Table 3. *Guadua* mass loss during pyrolysis and combustion for several temperature ranges

Temperature range [°C]	Mass loss [wt.%]
Pyrolysis	
25 - 209	8.1
209 - 330	36.3
330 - 600	30.6
600 - 800	2.3
Combustion	
25 - 209	8.3
209 - 285	37.5
285 - 315	29.0
315 - 333	18.1
333 - 800	3.4

According to Senneca et al. (Senneca et al., 2002), there are several pathways for solid fuel combustion, the extreme ones being: (a) devolatilization (pyrolysis) and volatile combustion followed by char combustion, which occur as sequential steps; and (b) heterogeneous oxidation of fixed carbon and volatile matter. The pathway undergone by the solid fuel depends on the characteristics of the fuel and the operational conditions (particle size, temperature and oxygen partial pressure) (Senneca et al., 2002). Fig. 1 shows that in an oxidizing atmosphere, devolatilization is highly accelerated in comparison with an inert atmosphere. There is one peak that ends at a lower temperature than that corresponding to inert pyrolysis, and which has in addition and a shoulder related to char combustion. In the combustion profile of forest pinewood waste, Amutio et al. (Amutio et al., 2012) found not only that the main peak ends at lower temperatures but also a second peak at higher temperatures. Lu and Chen (Lu and Chen, 2015) also obtained similar results in the DTG of a type of bamboo (*Dendrocalamus latiflorus* Munro). In the DTG of this research, the second peak was converted into a shoulder due probably to the fact that a much higher oxygen concentration (100%) was used. According to Senneca et al. (Senneca et al., 2002), DTG profile (Fig. 1) would indicate that the pathway for *Guadua* combustion is intermediate between the two extreme ones (a) and (b). Thus, during oxidative pyrolysis, not only the emission and diffusion of volatiles is produced, but also the heterogeneous oxidation of the pyrolyzable fraction. This heterogeneous oxidation may be enhanced by the high concentrations of potassium in *Guadua*. Shen and Quilei (Shen and Quilei, 2006) reported that alkalis (including potassium salts) weaken the intermolecular interaction of the polymeric chains by an oxygen transfer mechanism. Therefore, the activation energy of the pyrolysis decreases, volatile concentration increases and, consequently, ignition (the beginning of stable combustion) occurs earlier (Shen and Quilei, 2006). Thus, the high K concentration of *Guadua* may affect its combustion substantially. During oxidative pyrolysis, not for all types of biomass, there is a heterogeneous oxidation of the pyrolyzable fraction (Senneca et al., 2002). The behavior of *Guadua* during oxidative pyrolysis may be an advantage for its gasification in a downdraft gasifier. Salovaara et al. (Salovaara et al., 2015) found that, in general, Bamboo seems to be a satisfying feedstock for downdraft gasifiers. However, not all the five species studied showed the same characteristics, *Bambusa oldhamii* Munro and *Dendrocalamus strictus* being the best ones (Salovaara et al., 2015).

#### 4. CONCLUSION

The combustion profile of the bamboo species *Guadua angustifolia* Kunth obtained by thermogravimetric analysis with an oxygen flow rate of 50 cm<sup>3</sup>/min and at a heating rate of 10 °C/min shows that devolatilization + volatile combustion stage and char combustion occurs mainly in the ranges 209 °C – 315 °C and 315 – 333 °C, respectively. The devolatilization of *Guadua* during its oxidative pyrolysis is highly accelerated with respect to that during inert pyrolysis. The devolatilization interval during pyrolysis in nitrogen with the same flow rate and heating rate was 209 °C – 370 °C. The maximum mass loss rate during combustion ( $3.84 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ) was much higher than during pyrolysis ( $1.17 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ). This fact is related to the use of a flow of oxygen and, probably, also to the high content of potassium of *Guadua*, since it acts as a catalyst promoting the heterogeneous oxidation of the pyrolyzable fraction at lower temperature. Thus, in spite of the fact that biomass has low ash yield, its inorganic composition has a significant influence on its behavior during its thermal processing.

#### REFERENCES

- Amutio, M., Lopez, G., Aguado, R., Artetxe, M., Bilbao, J., Olazar, M., 2012. Kinetic study of lignocellulosic biomass oxidative pyrolysis. *Fuel* 95, 305–311. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2011.10.008>
- Anca-Couce, A., Scharler, R, 2017. Modelling heat of reaction in biomass pyrolysis with detailed reaction schemes. *Fuel* 206, 572–579. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2017.06.011>
- Dutta, P.P., Das, A., Pandey, V., Devi, M., 2014 Fuel Characteristics of Some Locally Available Biomass as a Potential Gasification Feedstock for Thermal Application. *Ind. Eng. Chem. Res.* 53, 19806–19813. <http://dx.doi.org/10.1021/ie5034107>



- Espinosa-Pérez, D.C., 2004. La Cadena de la Guadua en Colombia - Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural - Colombia.
- Folgueras, M.B., Fernández, F.J., Ardila, C.R., Alonso, M., Lage, S., 2017. Fast pyrolysis of *Guadua angustifolia*-Kunth. *Energy Procedia* 136, 60–65. <http://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.10.283>
- Fryda, L., Daza, C., Pels, J., Janssen, A., Zwart, R., 2014. Lab-scale co-firing of virgin and torrefied bamboo species *Guadua angustifolia* Kunth as a fuel substitute in coal fired power plants. *Biomass and bioenergy* 65, 28–41. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2014.03.044>
- Londoño, X., 2011. El bambú en Colombia. *Biotecnología Vegetal* 11(3), 143–154.
- Lu, J.J., Chen, W.H., 2015. Investigation on the ignition and burnout temperatures of bamboo and sugarcane bagasse by thermogravimetric analysis. *Applied Energy* 160, 49–57. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.09.026>
- Oyedun, A.O., Gebreegziabher, T., Hui, C.W., 2013. Mechanism and modelling of bamboo pyrolysis. *Fuel Processing Technology* 106, 595–604. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuproc.2012.09.031>
- Riaño, N., Londoño, X., López, Y., Gómez, J., Camayo, G.C., 2002. Planth growth and biomass distribution on *Guadua angustifolia* Kunth in relation to ageing in the Valle del Cauca – Colombia. *Bamboo Sci. Cult.* 16(1), 43–51.
- Rodriguez, N., Dill, W., Bidegaray, P., 2006. Utilización del Bambú (*Guadua Angustifolia* Kunth) (Bambusoideae: Gramineae), como una Alternativa Sostenible de Construcción de Viviendas en la Zona Atlántica de Costa Rica. *Tierra Tropical* 2, 77–85.
- Salovaara, J., Romero-Tehuizil, H., Medrano Vaca, M.C., Huacuz Villamar, J., 2015. Pre-Operational Analysis of a Prototype Downdraft Gasifier Fueled by Bamboo. *Journal of Sustainable Bioenergy Systems* 5, 62–72. <http://dx.doi.org/10.4236/jsbs.2015.52006>
- Salas-Enríquez, B.G., Torres-Huerta, A.M., Conde-Barajas, E., Domínguez-Crespo, M.A., Díaz-García, L. Negrete-Rodríguez, M. L., 2016. Activated carbon production from the *Guadua amplexifolia* using a combination of physical and chemical activation. *J. Therm. Anal. Calorim.* 124, 1383–1398. <https://doi.org/10.1007/s10973-016-5238-8>
- Scurlock, J.M.O., Dayton, D.C., Hames, B., 2000. Bamboo: an overlooked biomass resource? *Biomass and Bioenergy* 19, 229–244. [https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(00\)00038-6](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(00)00038-6)
- Senneca, O., Chirone, R., Salatino, P., 2002. A Thermogravimetric Study of Nonfossil Solid Fuels. 2. Oxidative Pyrolysis and Char Combustion. *Energy & Fuels* 16, 661–668. <https://doi.org/10.1021/ef0102061>
- Vassilev, S.V., Baxter, D., Andersen, L.K., Vassileva, C.G., 2010. An overview of the chemical composition of biomass. *Fuel* 89, 913–933. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2009.10.022>
- Vassilev, S.V., Baxter, D., Andersen, L.K., Vassileva, C.G., Morgan, T.J., 2012. An overview of the chemical composition of biomass. *Fuel* 94, 1–33. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2009.10.022>
- Yang, H., Yan, R. Chen, H., Lee, D.H., Zheng, C., 2007. Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis. *Fuel* 86, 1781–1788. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2006.12.013>





**REPÚBLICA DE COLOMBIA  
SUPERINTENDENCIA DE INDUSTRIA Y COMERCIO**

Resolución N° 82441

Ref. Expediente N° NC2018/0000532

*Por la cual se otorga una Patente de Modelo de Utilidad*

**EL DIRECTOR DE NUEVAS CREACIONES**

en ejercicio de sus facultades legales, en especial de las conferidas en el numeral 5° del artículo 20 del Decreto 4886 de 2011, y

**CONSIDERANDO**

**PRIMERO:** Que mediante escrito radicado en esta Superintendencia el 21 de enero de 2018 con el N° NC2018/0000532, por CRISTIAN ROLANDO ARDILA PEREZ, presentó la solicitud de patente de modelo de utilidad titulada “REACTOR DE GASIFICACIÓN DE CONFIGURACIÓN MÚLTIPLE (PARA BIOMASA)”.

**SEGUNDO:** Que la solicitud fue publicada en la Gaceta de la Propiedad Industrial N° 820 el 9 de marzo de 2018, sin que se hubieran presentado oposiciones por parte de terceros.

**TERCERO:** Que realizado el examen de fondo mediante Oficio N° 8630, notificado el 16 de julio de 2018, se requirió al solicitante en los términos del artículo 45 de la Decisión 486 de la Comisión de la Comunidad Andina para que presentara respuesta a las observaciones de carácter técnico, relacionadas con la patentabilidad o cumplimiento de los requisitos establecidos por esta Decisión para la concesión de la patente.

**CUARTO:** Que el solicitante mediante escrito radicado bajo el N° NC2018/0000532 el 27 de agosto de 2018, respondió oportunamente el requerimiento formulado y presentó aclaraciones. Posteriormente, mediante escrito radicado bajo el N° NC2018/0010875 el 27 de septiembre de 2018, el solicitante presentó la reivindicación 1 para que sea tenida en cuenta al momento de realizar el examen definitivo de la solicitud. Se acepta este último capítulo reivindicatorio presentado, comoquiera que se ajusta a las prescripciones contenidas en el artículo 34 de la Decisión 486.

**QUINTO:** Que en virtud de lo dispuesto en el artículo 14 de la Decisión 486 expedida por la Comisión de la Comunidad Andina “*Los países miembros otorgarán patentes para las invenciones, sean de producto o de procedimiento, en todos los campos de la tecnología, siempre que sean nuevas, tengan nivel inventivo y sean susceptibles de aplicación industrial*”.



REPÚBLICA DE COLOMBIA  
SUPERINTENDENCIA DE INDUSTRIA Y COMERCIO

Resolución N° 82441

Ref. Expediente N° NC2018/0000532

Asimismo, el artículo 81 de la Decisión 486 indica “Se considera modelo de utilidad, a toda nueva forma, configuración o disposición de elementos, de algún artefacto, herramienta, instrumento, mecanismo u otro objeto o de alguna parte del mismo, que permita un mejor o diferente funcionamiento, utilización o fabricación del objeto que le incorpore o que le proporcione alguna utilidad, ventaja o efecto técnico que antes no tenía. Los modelos de utilidad se protegerán mediante patentes”.

**SEXTO:** Que en el presente caso la reivindicación 1 incluida en el radicado bajo el N° NC2018/0010875 el 27 de septiembre de 2018, cumple los requisitos indicados en el considerando anterior y, en consecuencia, este Despacho encuentra procedente conceder para la misma la patente solicitada.

**SÉPTIMO:** Que de acuerdo con la modificación presentada por el solicitante en el escrito radicado bajo el N° NC2018/0000532 el 28 de febrero de 2018 y teniendo en cuenta el objeto concedido, se modifica el título de la invención el cual quedará de la siguiente manera: “REACTOR DE GASIFICACIÓN DE LECHO FIJO PARA CORRIENTE DESCENDENTE, ASCENDENTE Y CORRIENTE CRUZADA”.

Con fundamento en las anteriores consideraciones, el Director de Nuevas Creaciones,

**RESUELVE**

**ARTÍCULO PRIMERO:** Otorgar patente de modelo de utilidad para la creación titulada:

**“REACTOR DE GASIFICACIÓN DE LECHO FIJO PARA CORRIENTE  
DESCENDENTE, ASCENDENTE Y CORRIENTE CRUZADA”**

**Clasificación IPC:** C10J 3/20, C10J 3/26, C10J 3/46, C10J 3/66.

**Reivindicación(es):** 1 incluida en el radicado bajo el N° NC2018/0010875 el 27 de septiembre de 2018, de acuerdo con el anexo 1.

**Titular(es):** CRISTIAN ROLANDO ARDILA PEREZ.

**Domicilio(s):** DG 17B # 89-50 TORRE 7 APTO 103, EL ENCANTO, COLOMBIA.

**Inventor(es):** Cristian Rolando ARDILA PEREZ.

**Vigente desde:** 21 de enero de 2018

**Hasta:** 21 de enero de 2028.



**REPÚBLICA DE COLOMBIA  
SUPERINTENDENCIA DE INDUSTRIA Y COMERCIO**

Resolución N° 82441

Ref. Expediente N° NC2018/0000532

**ARTÍCULO SEGUNDO:** El titular tendrá los derechos y las obligaciones establecidos en la Decisión 486 de la Comisión de la Comunidad Andina y en las demás disposiciones legales vigentes sobre propiedad industrial, precisando que para mantener vigente la patente se deberá cancelar la tasa anual de mantenimiento, conforme lo dispone el artículo 80 de la referida norma comunitaria.

**ARTÍCULO TERCERO:** Notificar el contenido de la presente resolución a CRISTIAN ROLANDO ARDILA PEREZ, advirtiéndole que contra ella procede el recurso de apelación, ante el Superintendente Delegado para la Propiedad Industrial, del cual podrá hacer uso en el momento de la notificación o dentro de los diez (10) días hábiles siguientes a ella.

**NOTIFÍQUESE Y CÚMPLASE**

Dada en Bogotá D.C., el 7 de noviembre de 2018



**JOSE LUIS SALAZAR LOPEZ  
DIRECTOR DE NUEVAS CREACIONES**



**REPÚBLICA DE COLOMBIA  
SUPERINTENDENCIA DE INDUSTRIA Y COMERCIO**

Resolución N° 82441

Ref. Expediente N° NC2018/0000532

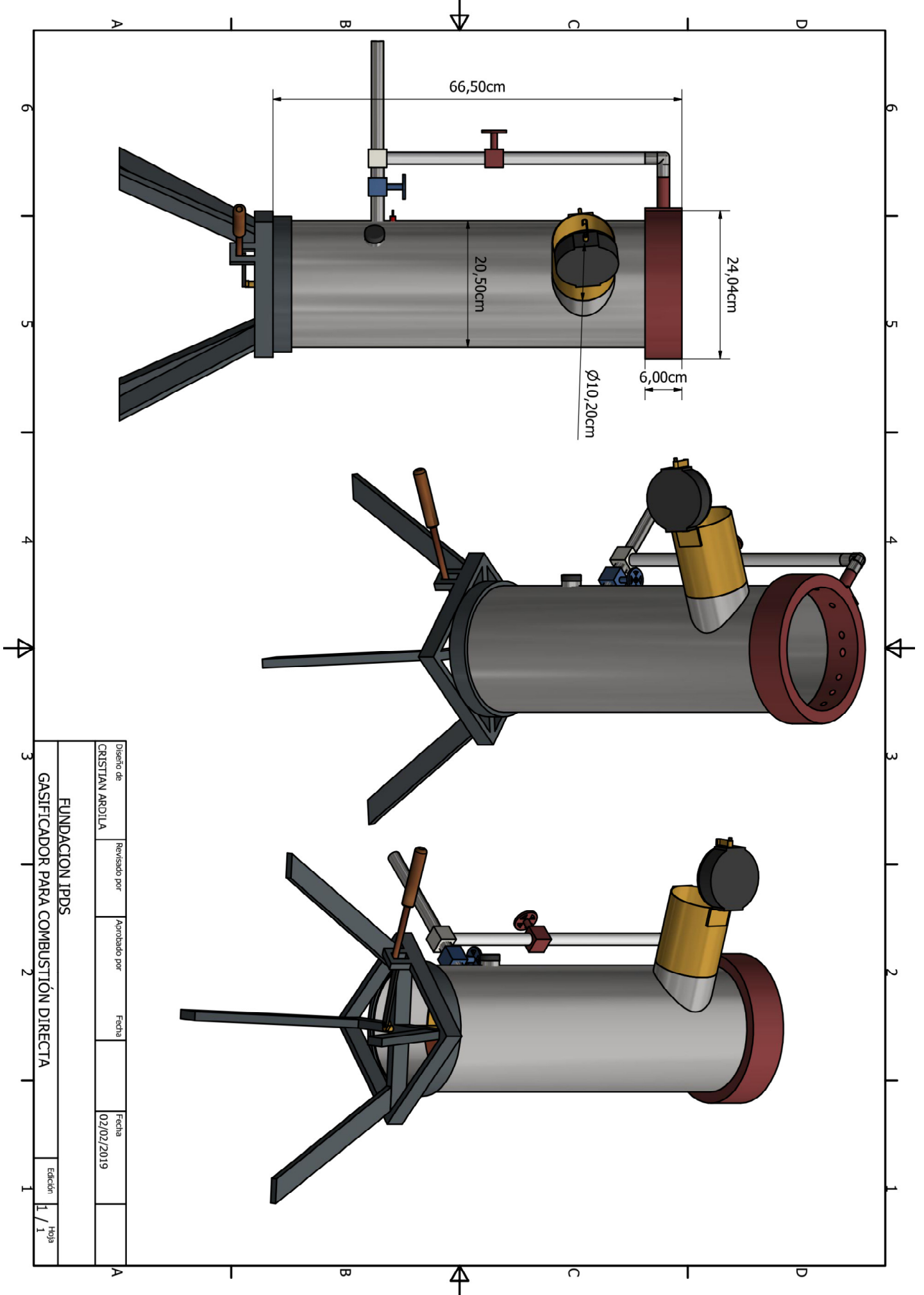
**ANEXO 1**

**REIVINDICACIONES CONCEDIDAS**

1) Un Reactor de Gasificación de Lecho Fijo para Corriente Descendente, Ascendente y Corriente Cruzada para la obtención de un gas combustible por descomposición termoquímica de biomasa de origen leñoso, caracterizado por estar compuesto por un cuerpo cilíndrico (1), que lleva en interior otro cilindro (1), dos de puertos de entradas(7),(8) y tres puertos de salidas (9),(10), (12) ubicados en el cilindro exterior, todos los puertos poseen llaves ((7a), (8a, 8b),(9a),(10a), (12a, 12b)), que permiten su apertura o cierre según convenga y dos de estos puertos (9 y 10) se unen por intermedio de una te (13) , en el interior del cilindro exterior está ubicada una parrilla giratoria (4) anclada a la base tapa roscada (5) del fondo del cilindro exterior, para remoción de cenizas de la zona de combustión(3).



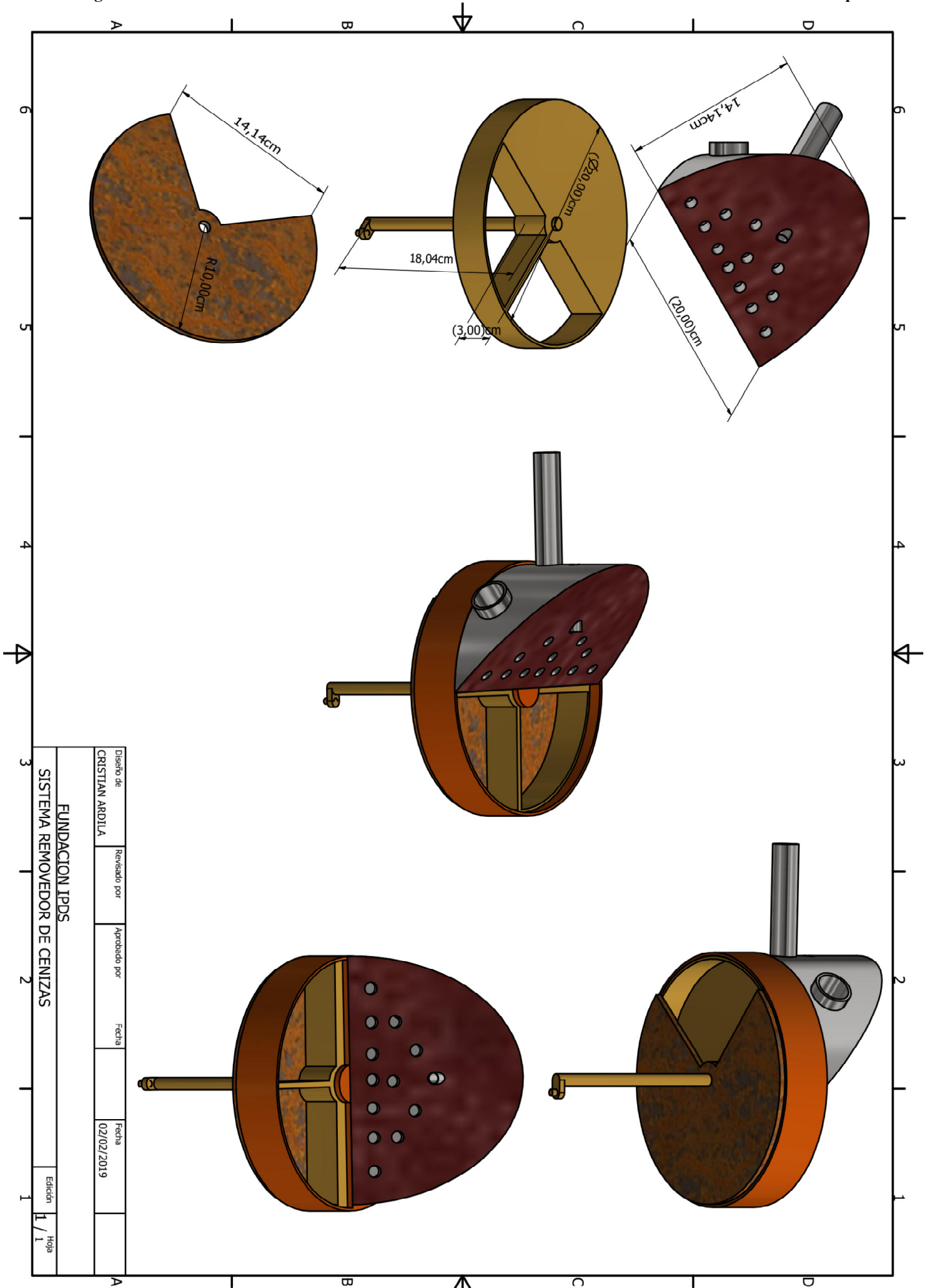
Anexo 4.1. Imágenes ilustrativas del modelo 3D del reactor de gasificación para combustión directa de Guadua Angustifolia



Diseño de	Revisado por	Aprobado por	Fecha	Fecha	Edición	Hoja
CRISTIAN ARDILA				02/02/2019		1 / 1

FUNDACION IPDS  
GASIFICADOR PARA COMBUSTIÓN DIRECTA

Anexo 4.2. Imágenes ilustrativas del modelo 3D del sistema de remoción de cenizas del reactor de combustión directa para Guadua



Diseno de	Revisado por	Aprobado por	Fecha	Fecha	Edición	Hoja
CRISTIAN ARDILA			02/02/2019		1	1

FUNDACION IPDS  
SISTEMA REMOVEROR DE CENIZAS

Anexo 4.3. Detalles del modelo propuesto para seccionado de Guadua Angustifolia

