

EVALUACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE GAS Y LÍQUIDO COMBUSTIBLE
MEDIANTE EL PROCESO DE PIRÓLISIS DE MADERA PARA APLICACIÓN EN
LA ZONA DEL RESGUARDO YAIGOJÉ EN EL VAUPÉS COLOMBIANO

LAURA CAMILA PEÑA CASTILLO

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BOGOTÁ D.C,
2019

EVALUACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE GAS Y LÍQUIDO COMBUSTIBLE
MEDIANTE EL PROCESO DE PIRÓLISIS DE MADERA PARA APLICACIÓN EN
LA ZONA DEL RESGUARDO YAIGOJÉ EN EL VAUPÉS COLOMBIANO.

LAURA CAMILA PEÑA CASTILLO

Proyecto integral de grado para obtener el título de
INGENIERO QUÍMICO

Director
MAURICIO GNECCO
Ingeniero mecánico

MIGUEL ANDRES BORBÓN PARDO
Ingeniero electrónico

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BOGOTÁ D.C
2019

Nota de aceptación

Ing. Oscar Libardo Lombana Charfuelan

Ing. Claudio Alberto Moreno Arias

Ing. Felipe Correa Mahecha

Bogotá D.C, febrero del 2019

DIRECTIVAS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro

Dr JAIME POSADA DÍAZ

Vicerrector de Desarrollo y Recursos Humanos

Dr LUIS JAIME POSADA GARCÍA-PEÑA

Vicerrectora Académica y de Posgrados

Dra ANA JOSEFA HERRERA VARGAS

Decano de Facultad de Ingenierías.

Ing. JULIO CESAR FUENTES ARISMENDI

Director programa de Ingeniería Química

Ing. LEONARDO DE JESÚS HERRERA GUTIERREZ

Las directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestos en el presente documento. Estos corresponden únicamente a los autores.

DEDICATORIA

A Dios por ser el centro y motor de mi vida, por darme la oportunidad de culminar con éxito mi proceso académico y llevar a feliz término este proyecto de investigación.

A mis padres por su apoyo incondicional en todas y cada una de las cosas que he decidido hacer en mi vida, por su amor infinito, su dedicación, su paciencia y su preocupación; por ser el mejor ejemplo en mi vida el cual me permite ser hoy la mujer trabajadora, dedicada, integra y soñadora que soy, por ser mi inspiración para salir adelante, por enseñarme la mejor cara de la vida, esto es para ustedes.

A mi hermana por su apoyo incondicional y compañía, quien hoy está a puertas de comenzar su vida universitaria, a quien hoy le digo que crea en sus sueños y capacidades, porque todo es posible siempre y cuando así lo quieras y trabajes día a día para lograrlo.

A mi abuela materna por su apoyo y preocupación, su cariño y amor, por siempre estar pendiente de mí y mi proceso académico, estando siempre disponible y dispuesta a colaborar en todo.

Laura Camila Peña Castillo

AGRADECIMIENTOS

Doy gracias a Dios y a la Virgen por permitirme culminar esta etapa de mi vida, por ser mis guías, mi fortaleza y alivio en los momentos de dificultad y mis acompañantes incondicionales en la vida.

A mis padres por su acompañamiento durante mi proceso académico y la elaboración de mi trabajo de grado, por su apoyo incondicional, por ser parte de este proyecto de principio a fin, por acompañarme en los viajes, por su constante disposición y colaboración, por sus infinitos esfuerzos no solo durante el desarrollo de este proyecto si no durante toda mi vida.

Al amor por siempre estar ahí para mí, por no dejarme desfallecer en los momentos de angustia, por tener siempre palabras de aliento, por su apoyo infinito e incondicional, por tener siempre una disposición de ayuda y colaboración, simplemente gracias por ser parte de mi vida y mis proyectos.

A cada uno de mis compañeros y amigos que hicieron parte de esta gran aventura.

Quiero agradecer a mi director Mauricio Gnecco por su orientación y acompañamiento en el desarrollo del proyecto, así mismo a mi orientador Oscar Lombana por su disposición y colaboración para con el proyecto durante toda su realización; Quiero agradecer además al profesor Diego Rodríguez, por su colaboración y entrega con el proyecto en su fase inicial, quien a pesar de no haberlo podido culminar, sin duda me ayudo a iniciar con pie derecho mi trabajo de grado.

Por último, agradecer a los docentes de la Fundación Universidad América quienes me guiaron y brindaron sus conocimientos a lo largo de toda la carrera permitiéndome realizar con éxito mi Trabajo de Grado.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	23
OBJETIVOS	26
1. MADERAS TROPICALES Y SUS CARACTERÍSTICAS	27
1.1 LA MADERA COMO FUENTE DE ENERGÍA	27
1.2 PROCESOS DE TRANSFORMACIÓN DE BIOMASA	29
1.2.1 Procesos de combustión directa	31
1.2.2 Procesos termoquímicos	31
1.2.2.1 Pirólisis	31
1.2.2.2 Gasificación	33
1.2.3 Procesos bioquímicos	33
1.2.3.1 Digestión anaerobia	33
1.2.3.2 Fermentación	34
1.3 PIRÓLISIS DE MADERA	34
1.4 YAIGOJÉ APAPORIS	36
1.4.1 Maderas tropicales, Yaigojé Apaporis	37
1.5 PARÁMETROS DE INTERÉS PARA MADERAS CON FINES TÉRMICOS	42
1.5.1 Contenido de cenizas	43
1.5.2 Composición de la biomasa	43
1.5.3 Densidad de la biomasa	43
1.5.4 Contenido de humedad	44
1.5.5 Tamaño de partícula	44
1.5.6 Contenido de celulosa, hemicelulosa y lignina	44
1.5.7 Poder calorífico de la biomasa	45
2. CARACTERIZACIÓN DE LA BIOMASA	46
2.1 Muestreo	46
2.1.1 Localización	47
2.2 CARACTERIZACIÓN DE LAS MUESTRAS	48
2.2.1 Características organolépticas	49
2.2.2 Densidad de las muestras	51
2.2.3 Humedad	52
2.2.4 Cenizas y material orgánico	54
2.2.5 Granulometría	55
2.2.6 Análisis elemental	56
2.2.7 Análisis de fracciones	58
2.2.8 Poder calorífico	60
3. PROCESO PIROLÍTICO DE MADERAS TROPICALES	63
3.1 PRE-TRATAMIENTO DE LA BIOMASA	63

3.1.1 Operación de secado	64
3.1.2 Reducción de tamaño de partícula	71
3.2 PIRÓLISIS DE MADERA, EXPERIMENTACIÓN	75
3.2.1 Desarrollo experimental exploratorio	77
3.2.2 Experimentación	82
3.2.2.1 Reactor SemiBatch	83
3.2.2.2 Conector de gases	84
3.2.2.3 Condensador en húmedo	85
3.2.2.4 Quemador de gas (Tea)	86
3.2.2.5 Controladores de temperatura	86
3.2.2.6 Medidor de presión	87
3.3 RENDIMIENTO PROCESO DE PIRÓLISIS	87
3.4 ANÁLISIS DE PRODUCTO GASEOSO (CROMATOGRAFÍA DE GASES)	91
3.5 BALANCE DE ENERGÍA	102
4. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL PROCESO DE PIRÓLISIS DE MADERA	104
4.1 CRITERIOS DE DISEÑO	104
4.1.1 Cantidad de materia prima requerida	104
4.2 PROPUESTA DE DISEÑO	108
4.2.1 Pre-tratamiento de la madera	108
4.2.1.1 Secado	109
4.2.1.2 Reducción de tamaño	113
4.2.2 Caracterización del reactor	114
4.2.3 Usos productos pirólisis	116
4.2.3.1 Producto sólido (Biochar)	116
4.2.3.2 Producto líquido	118
4.2.3.3 Producto gaseoso	119
4.2.4 Diagrama PFD	119
4.3 PROPUESTA ALTERNATIVA DE DISEÑO	120
4.3.1 Balance de energía	125
5. COSTOS UNITARIOS DEL PROYECTO	127
6. CONCLUSIONES	133
7. RECOMENDACIONES	136
BIBLIOGRAFÍA	138
ANEXOS	149

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Densidades energéticas de diferentes fuentes de biomasa.	28
Figura 2. Vías de conversión de diferentes residuos biomásicos.	30
Figura 3. Pirólisis de biomasa y aplicaciones.	32
Figura 4. Descomposición de la celulosa en los productos de la pirólisis	36
Figura 5. Ubicación Yaigojé Apaporis.	37
Figura 6. Temperatura media de Villavicencio.	47
Figura 7. Humedad relativa - Villavicencio.	47
Figura 8. Localización muestreo.	48
Figura 9. Partes del tronco de la madera.	50
Figura 10. Composición de la pared celular de biomasa lignocelulosica	58
Figura 11. Curva de secado de la madera	65
Figura 12. Efecto de la temperatura sobre los productos de pirólisis de madera	82
Figura 13. Reacción general de pirólisis	88
Figura 14. Mecanismo de reacción del proceso de pirólisis	88
Figura 15. Principio general de un secador solar para madera	110
Figura 16. Operación de reducción de tamaño de partícula	123
Figura 17. Astillado de la madera	123
Figura 18. Esquema de los diferentes tipos de gasificadores de lecho fijo	124
Figura 19. Maloka indígena, lugar de ubicación de los equipos	127
Figura 20. Gasificador Power pallet pp20	128

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Distribución energética de un árbol	28
Tabla 2. Rendimiento típico de los productos (base madera seca) obtenidos por los diferentes modos de pirólisis	35
Tabla 3. Densidad de muestras a 18°C y su corrección	52
Tabla 4. Datos iniciales de humedad y masa de las muestras	53
Tabla 5. Contenido de humedad para diferentes tipos de biomasa solida	53
Tabla 6. Porcentaje de cenizas y materia orgánica	54
Tabla 7. Datos de tamizado	55
Tabla 8. Diámetro medio de partícula de las muestras	56
Tabla 9. Composición química de diferentes fuentes de biomasa	57
Tabla 10. Composición elemental de la madera	57
Tabla 11. Contenido de celulosa, hemicelulosa y lignina de diferentes residuos y desechos	59
Tabla 12. Composición estructural de la madera	60
Tabla 13. Poder calorífico de la madera	61
Tabla 14. Poder calorífico de distintos tipos de madera	62
Tabla 15. Pendiente de curvas de secado de madera al aire libre	66
Tabla 16. Porcentaje de reducción de humedad con secado en horno	69
Tabla 17. Resultados balance de masa, operación de secado	70
Tabla 18. Porcentaje de humedad antes y después de operación de secado	71
Tabla 19. Datos de molienda y balance de masa	73
Tabla 20. Amperaje en proceso de molienda.	73
Tabla 21. Consumo eléctrico, proceso de molienda	74
Tabla 22. Agrupación de muestras por densidad	75
Tabla 23. Densidad de las mezclas A, B y C	77
Tabla 24. Densidad de maderas de la región oriente y sur del país	79
Tabla 25. Masa de mezclas a pirolizar 1*, 2* y 3*	81
Tabla 26. Dimensiones del reactor pirolítico	84
Tabla 27. Dimensiones del conector de gases	85
Tabla 28. Dimensiones del condensador en húmedo	86
Tabla 29. Dimensiones de la tea	86
Tabla 30. Resultados proceso pirolítico de maderas tropicales a 650°C	89
Tabla 31. Rendimiento del proceso (650°C)	90
Tabla 32. Resultados proceso pirolítico mezcla 3* para muestreo de gas	92
Tabla 33. Rendimiento del proceso (700°C)	92
Tabla 34. Distribución de productos de pirólisis de diferentes materias primas	92
Tabla 35. Resultados cromatografía del gas	98
Tabla 36. Rendimiento (% en peso) de algunos de los compuestos detectados por GC-MS, para diferentes productos gaseosos de pirólisis de madera	100
Tabla 37. Poder calorífico del gas producto del proceso de pirólisis	106
Tabla 38. Distribución aproximada de productos de pirólisis para una alimentación de 67 kg	116

Tabla 39. Propiedades físicas de los bioaceites obtenidos a partir de pirólisis de biomasa	118
Tabla 40. Descripción y función de equipos	120
Tabla 41. Descripciones de corrientes de proceso	120

LISTA DE GRÁFICOS

Grafico 1. Progresión de secado al aire libre	pág. 66
Grafico 2. Progresión de secado en horno	68

LISTA DE ECUACIONES

	pág.
Ecuación 1. Cálculo para densidad	51
Ecuación 2. Corrección de densidad	51
Ecuación 3. Cálculo del porcentaje de Cenizas	54
Ecuación 4. Cálculo del porcentaje de Materia orgánica	54
Ecuación 5. Cálculo del diámetro medio de partícula (Dm)	55
Ecuación 6. Cálculo para la construcción de curva de secado	69
Ecuación 7. Balance de masa, operación de secado	70
Ecuación 8. Balance de masa en el molino	73
Ecuación 9. Ley de Ohm	74
Ecuación 10. Cálculo de potencia eléctrica	74
Ecuación 11. Cálculo de la densidad de una mezcla sólida	77
Ecuación 12. Cálculo de calor transferido por las resistencias	93
Ecuación 13. Cálculo de calor transferido con pérdidas por radiación, convección y conducción	93
Ecuación 14. Cálculo del área superficial del reactor	94
Ecuación 15. Cálculo de pérdida de calor por conducción	95
Ecuación 16. Cálculo de pérdida de calor por convección	95
Ecuación 17. Cálculo de pérdida de calor por radiación	95
Ecuación 18. Cálculo calor entregado por las resistencias	95
Ecuación 19. Balance de energía para un sistema cerrado	102
Ecuación 20. Primera ley de la termodinámica para sistemas cerrados	103
Ecuación 21. Cálculo de la energía interna del sistema de pirólisis a 650°C	103
Ecuación 22. Cálculo de la energía interna del sistema de pirólisis a 700°C	103
Ecuación 23. Cálculo del poder calorífico del gas	105
Ecuación 24. Cantidad de madera requerida, proceso de pirólisis	108
Ecuación 25. Relación diámetro altura	114
Ecuación 26. Calculo del volumen del reactor para 67 kg	114
Ecuación 27. Cálculo de las dimensiones del reactor	115
Ecuación 28. Cantidad de madera requerida, proceso de gasificación	122
Ecuación 29. Balance de energía para el proceso de gasificación	125
Ecuación 30. Estimación del costo de fabricación del equipo de pirólisis	129

LISTA DE CUADROS

	pág.
Cuadro 1. Características organolépticas de las muestras de madera	49
Cuadro 2. Masa total de mezclas A, B y C	76
Cuadro 3. Formación de mezclas a pirolizar	80
Cuadro 4. Presupuesto alternativa de diseño por pirólisis	130
Cuadro 5. Presupuesto alternativa de diseño por gasificación	131

LISTA DE IMÁGENES

	pág.
Imagen 1. Medidor de humedad y temperatura VA 8040	53
Imagen 2. Fraccionamiento de las muestras	67
Imagen 3. Muestras 1 y 3	75
Imagen 4. Muestras 2, 4 y 5	76
Imagen 5. Muestras 6 y 7	76
Imagen 6. Instalaciones proceso pirolítico en Laboratorios Calderón	83
Imagen 7. Resistencia del reactor pirolítico	84
Imagen 8. Montaje del reactor en cobertura cerámica	84
Imagen 9. Condensador en húmedo	85
Imagen 10. Controladores de temperatura	87
Imagen 11. Medidor de presión	87
Imagen 12. Muestreo de gas	96
Imagen 13. Cromatógrafo gases/masa	96
Imagen 14. Jeringa para inyección manual del gas al cromatógrafo	97
Imagen 15. Secador solar circular	112
Imagen 16. Secador solar cuadrado	112
Imagen 17. Reducción de tamaño de troncos de madera	113

LISTA DE DIAGRAMAS

	pág.
Diagrama 1. Procesos de conversión de biomasa y sus productos	24
Diagrama 2. Esquema del proceso de pirólisis de madera	63
Diagrama 3. Operación de secado	70
Diagrama 4. Proceso de molienda	72
Diagrama 5. Diagrama proceso de reacción de pirólisis de madera	89
Diagrama 6. Dimensiones del reactor	115
Diagrama 7. Diagrama PFD, proceso de pirólisis de madera	119

LISTA DE ANEXOS

Anexo A. Muestreo y caracterización de madera	pág. 150
Anexo B. Proceso de pirólisis de madera	162
Anexo C. Especificaciones técnicas del proceso	180
Anexo D. Presupuesto de inversión	183

ABREVIATURAS Y UNIDADES

°C: grados Celsius.

ρ : densidad.

σ : Desviación estándar.

μ : Micro litros

A: Amperio

C₃H₈: propano.

C₄H₁₀: butano.

CH₄: metano.

cmH₂O: centímetros de columna de agua.

CO: monóxido de carbono.

CO₂: dióxido de carbono.

g: gramos.

Gal: galón.

h: Horas

H₂: Hidrogeno.

I: Corriente.

kg: kilogramos.

kJ: Kilo julios

kPa: Kilo pascal.

min: minutos.

ml: mililitros.

msnm: Metros sobre el nivel del mar.

PC: Poder calorífico.

pH: índice de acidez o basicidad de una solución.

PM: Peso molecular.

PX7: referencia del dispositivo que mide la temperatura de las resistencias del reactor.

s: Segundos

T: temperatura.

TC4Y: referencia de la termocupla que registra la temperatura de los vapores pirolíticos.

W: Vatio

WWF: Word Wildlife Fund.

GLOSARIO

ALBURA: el nombre científico para albura es xilema. Esta capa la forma una red de células vivas que traen agua y nutrientes desde las raíces hasta las ramas y hojas. Es la madera más joven del árbol y más blanda, con los años, las capas internas de albura mueren y se convierten en duramen.

ALQUITRAN: sustancia bituminosa, grasa, oscura, viscosa, semisólida y de olor fuerte, que se obtiene de la destilación -en ausencia de aire- de ciertas sustancias que posean materias volátiles; fundamentalmente de la hulla, el petróleo, la turba, los huesos y de algunas maderas resinosas.

AUTONOMÍA ENERGÉTICA: el término autonomía energética, hace referencia a la capacidad de un particular de producir parcial o totalmente su propia energía y de ser posible almacenarla, sin depender de los sistemas convencionales para la obtención de la misma.

BIOCOMBUSTIBLE: los biocombustibles contienen componentes derivados a partir de biomasa, es decir, organismos recientemente vivos o sus desechos metabólicos.

BIOMASA: 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.

CAMBIUN: es una capa de una sola célula de ancho, que sólo puede verse al microscopio, razón por la que no es importante desde el punto de vista de la descripción macroscópica; Sin embargo, su importancia radica en que sus células meristemáticas generan nuevos tejidos celulares, entre ellos la xilema, originando de esta forma el aumento del diámetro en el tronco (crecimiento secundario).

COMBUSTIBLE: un combustible es un material que al ser quemado puede producir calor, energía o luz. Generalmente el combustible libera energía de su estado potencial a un estado utilizable, sin importar si se hace de manera directa o mecánicamente, originando como residuo el calor.

COMPUESTO LIGNOCELULÓSICO: polímero presente de forma abundante en la superficie terrestre, se encuentra de manera natural en la biomasa y en muchos casos representa más de la mitad de su composición total. Su nombre hace referencia a su composición al estar formado por celulosa, hemicelulosa y lignina.

COGENERACIÓN DE ENERGÍA: es el proceso de producción simultánea de energía térmica (Calor útil) y energía eléctrica y/o mecánica, que hace parte

integrante de una actividad productiva destinada a procesos industriales o comerciales

DESARROLLO SOSTENIBLE: se entiende por desarrollo sostenible el que conduzca al crecimiento económico, a la elevación de la calidad de la vida y al bienestar social, sin agotar la base de recursos naturales renovables en que se sustenta, ni deteriorar el medio ambiente o el derecho de las generaciones futuras utilizarlo para la satisfacción de sus propias necesidades.

DURAMEN: el duramen es albura muerta en el centro del tronco. Es la madera más dura del árbol, por lo que proporciona soporte y fortaleza. Usualmente su color es más oscuro que la albura. Es la madera propiamente dicha, la que se utilizará como material tecnológico.

FUENTES NO CONVENCIONALES DE ENERGÍA: son fuentes no convencionales de energía, aquellas fuentes de energía disponibles a nivel mundial que son ambientalmente sostenibles, pero que en el país no son empleadas o son utilizadas de manera marginal y no se comercializan ampliamente.

MADERA HÚMEDA: dentro del contexto del proyecto, se definirá como madera húmeda, madera obtenida del río Apaporis (madera que corre y rueda por el río).

MATERIAL VOLÁTIL: fase obtenida como producto en la pirólisis, referente a los compuestos condensables y no condensables de la materia prima en proceso. En la fase no condensable (gases) se caracteriza la presencia de hidrógeno, metano y dióxido de carbono; mientras que la fase condensable (líquidos) se caracteriza por estar compuesta por alquitranes y aceites de bajo peso molecular.

PIRÓLISIS: es un proceso termoquímico mediante el cual el material orgánico de los subproductos sólidos se descompone por la acción del calor, en una atmósfera deficiente de oxígeno y se transforma en una mezcla líquida de hidrocarburos, gases combustibles, residuos secos de carbón y agua; los productos obtenidos en este proceso pueden ser utilizados para accionar motores Diesel, para producir electricidad, o para mover vehículos.

PSF: el punto de saturación de las fibras (PSF) se alcanza cuando a un determinado contenido de humedad el material no presenta cambios dimensionales ni variaciones en la resistencia mecánica.

ZONAS NO INTERCONECTADAS (ZNI): se entiende por Zonas No Interconectadas a los municipios, corregimientos, localidades y caseríos no conectadas al Sistema Interconectado Nacional (SIN).

RESUMEN

El presente trabajo de investigación, busca evaluar el proceso pirolítico de maderas tropicales, con el fin de establecer de manera propositiva especificaciones técnicas de diseño para la producción de energía eléctrica partiendo de madera húmeda, para posterior aplicación y beneficio de dos comunidades indígenas del resguardo Yaigojé en el Vaupés colombiano.

Para ello en primera instancia, mediante una revisión bibliográfica, se determina el potencial aprovechamiento energético de la madera, así como sus posibles rutas de transformación y conversión; a partir de esto se determinan los parámetros fisicoquímicos de interés que deben tenerse en cuenta para evaluar una fuente biomásica y el porqué de la importancia de su conocimiento para así poder establecer la influencia de dichos parámetros en el proceso de pirólisis.

Posteriormente se realizó la caracterización de 7 muestras de madera con base a los parámetros fijados en el paso anterior con el fin de conocer las principales características de la fuente biomásica a trabajar y de esta manera determinar su influencia sobre el proceso de pirólisis.

Como paso seguido se realizó de manera experimental el proceso pirolítico de las maderas tropicales muestreadas, así como sus respectivos procesos de pre tratamiento mediante las operaciones de secado y reducción de tamaño de partícula. Así mismo se establecieron los rendimientos del proceso para los 3 productos principales de la pirólisis (sólido, líquido y gas). Una vez cuantificados los rendimientos del proceso se procede a caracterizar el gas saliente mediante una cromatografía de gases con el fin de poder determinar la composición de los compuestos gaseosos que hacen parte de la mezcla de gas que sale del proceso, así como la determinación del poder calorífico de esta mezcla.

A continuación, se realizó la parte propositiva del proyecto, con base a los resultados obtenidos en la experimentación, se establecen condiciones técnicas de un proceso termoquímico con el objetivo de generar alternativas reales que puedan ser implementadas a largo plazo en el resguardo Yaigojé en el Vaupés colombiano.

Finalmente se establecen los costos unitarios del proyecto, en donde de manera aproximada se pueden visualizar los costos relacionados con la implementación y puesta en marcha del proceso.

PALABRAS CLAVE: pirólisis, biomasa, madera, cogeneración de energía, biocombustible.

INTRODUCCIÓN

El cambio climático es un fenómeno que se presenta como consecuencia principalmente de las emisiones de gases de efecto invernadero y su acumulación en la atmósfera de la tierra, producto básicamente de las actividades humanas; esta problemática se manifiesta en un aumento de la temperatura media de la tierra, y como consecuencia a esto se presentan alteraciones en los eventos climáticos de la misma. “En este sentido el cambio climático es consecuencia esencialmente de los actuales patrones de producción y consumo globales basados en el uso de combustibles fósiles y en procesos derivados de este estilo de desarrollo”¹. Por esta razón es que soluciones efectivas que mitiguen o reduzcan significativamente las consecuencias del cambio climático, hacen parte de uno de los retos más demandantes del presente siglo.

“La importancia de la acción sobre el cambio climático se subraya en el Quinto Informe de Evaluación (AR5) del Panel Internacional sobre Cambio Climático (IPCC), que sugiere que bajo las políticas actuales, las emisiones de CO₂ del sector energético podrían duplicarse o triplicarse para el año 2050”²; por esta razón según Froggatt y Schneider³ la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero como el CO₂, deben llegar a niveles que no sea probable que causen un cambio climático peligroso, lo que requerirá de una disminución significativa en la intensidad energética de las economías globales, junto con la reducción paulatina del uso de combustibles fósiles, ya que a pesar del intento de las economías mundiales por regular las emisiones de gases de efecto invernadero, las emisiones mundiales, principalmente del sector energético, han seguido creciendo y han aumentado de 32 mil millones de toneladas por año en 1997 a 34 mil millones de toneladas de CO₂ equivalente en 2012. En consecuencia, se necesitan esfuerzos adicionales para acelerar rápidamente el uso de fuentes de energía con bajo contenido de carbono.

Con base en esto y según Klug⁴ las energías eólica, solar, hidroeléctrica y de biomasa aparecen como alternativas renovables ampliamente estudiadas y utilizadas en la producción principalmente de calor y electricidad; por esta razón las energías renovables o alternativas (para este caso en particular, el uso de biomasa como fuente alterna de energía y los tratamientos necesarios para su aprovechamiento energético), se convierten en una solución prometedora para la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero, utilizando materias

¹ GALINDO, Luis Miguel, et al. Ocho Tesis Sobre El Cambio Climático Y El Desarrollo Sostenible En América Latina. [Sitio web]. Santiago: Naciones Unidas, 2015. [Consultado el 5 de marzo del 2018]. p. 7. Archivo pdf. Disponible en: https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/39840/1/S1501211_es.pdf

² FROGGATT, Antony y SCHNEIDER Mycle. Nuclear Power versus Renewable Energy - A Trend Analysis. Point of View. 2015, vol. 103, p. 487. ISSN 00189219

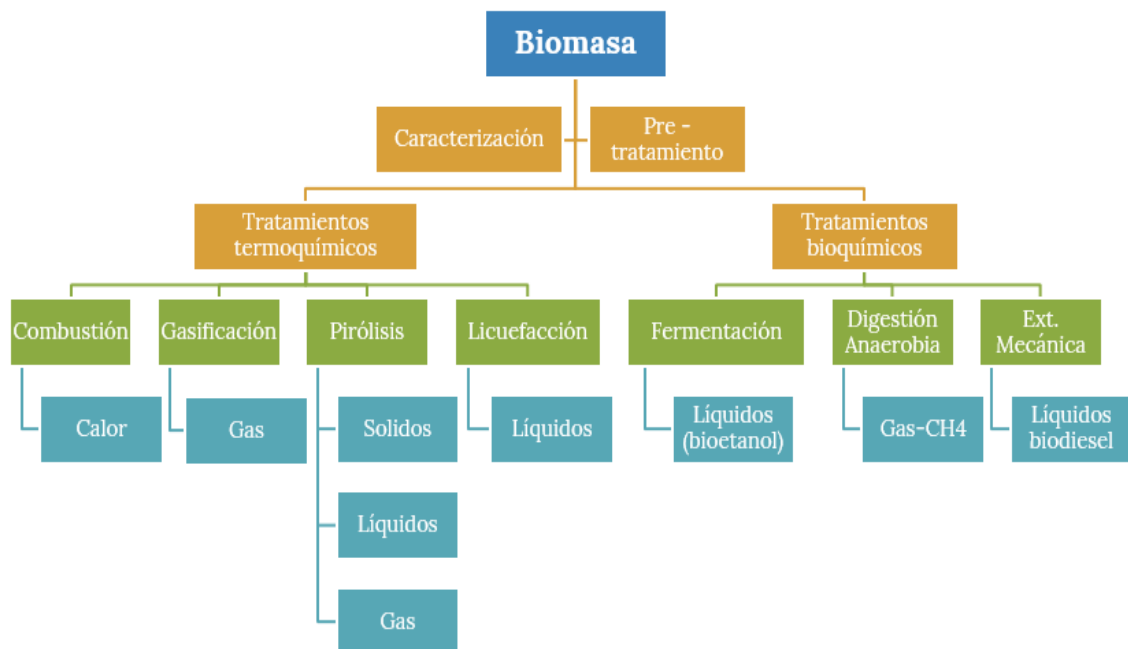
³ *Ibíd.*, p. 487.

⁴ KLUG Michael. Pirólisis, un proceso para derretir la biomasa. Revista De Química PUCP. vol. 26. [En línea]. 2012, p. 37. [Consultado 18 de marzo 2018]. ISSN 10123946. Disponible en: <http://revistas.pucp.edu.pe/index.php/quimica/article/viewFile/5547/5543>.

primas de orígenes diferentes a los tradicionales combustibles provenientes de fuentes fósiles.

A partir de esto se tiene que la biomasa, considerada como “toda materia que se puede derivar directa o indirectamente de la fotosíntesis de las plantas, encontrándose en forma vegetal o animal (...), la cual para fines energéticos puede provenir de fuentes como las cosechas de plantaciones, las herbáceas de cosecha anual, las gramíneas y las oleaginosas, entre otras”⁵, se convierte en una fuente combustible potencial que junto a sus procesos de transformación o conversión aparecen como una solución prometedora para mitigar el problema de emisiones de gases de efecto invernadero a la atmósfera y por ende el calentamiento global. “Antes de que la biomasa pueda ser utilizada para fines energéticos, tiene que ser convertida en una forma más conveniente para su transporte y utilización”⁶. Existen entonces diferentes procesos que permiten la conversión de la energía contenida en estas fuentes alternativas en energía útil.

Diagrama 1. Procesos de conversión de biomasa y sus productos.



Fuente: Elaboración propia con base en HERNANDEZ ORIO, Alberto. Introducción a los tratamientos térmicos de residuos. [En línea]. [Diapositivas], 2015. [Consultado en 6 abril 2018]. Disponible en: <https://es.slideshare.net/RedesExpertos/01-introducin-tratamientos-trmico-pir-gasinc-46938767>.

⁵ GÓMEZ, Alexander; KLOSE, Wolfgang y RINCÓN, Sonia. Pirólisis De Biomasa. Cuesco de Palma de aceite. Alemania: Kassel, 2008. 1 p. ISBN 978-3-89958-457-8

⁶ ENERGIZA. Procesos de conversión de Biomasa en energía. [Sitio web]. [Consultado el 26 de marzo de 2018]. Disponible en: <http://www.energiza.org/index.php/biomasa-2/56-procesos-de-conversion-de-biomasa-en-energia>.

En donde el proceso de pirólisis hace referencia a “una combustión incompleta a una temperatura aproximada de 500°C de la biomasa en condiciones anaerobias, es decir, en ausencia de oxígeno. Se utiliza desde hace mucho tiempo para producir carbón vegetal. Este método libera también un gas pobre, mezcla de monóxido (CO) y dióxido de carbono (CO₂), de hidrógeno (H₂) y de hidrocarburos ligeros. Este gas, de poco poder calórico, puede servir para accionar motores diésel, para producir electricidad, o para mover vehículos”⁷.

Con base a esto el proyecto busca entonces, implementar la pirólisis como un proceso alternativo a la producción de energía y de esta forma reducir las emisiones de gases de efecto invernadero integrando esta tecnología con el encuentro de culturas entre el blanco occidental y como se referencia en Territorio indígena y Gobernanza⁸ la población nativa Yakuna y Makuna, 2 de las 19 etnias ubicadas en el resguardo Yaigojé Apaporis, un territorio indígena ubicado en los departamentos Amazonas y Vaupés en el corazón de la Amazonía Colombiana. Esta interacción entre culturas busca generar un impacto ambiental positivo, una alternativa energética sostenible y además una mejora en el desarrollo energético de las culturas nativas colombianas. La problemática abordada, se centra en el mejoramiento del transporte de la zona que en su totalidad es fluvial y se realiza actualmente con motores fuera de borda, todos impulsados con gasolina; lo que se pretende con el desarrollo del proyecto es la evaluación del proceso de pirólisis de madera húmeda (madera que rueda y cae por el río Apaporis) como fuente de biomasa, con el fin de obtener gases, líquidos y sólidos aprovechables energéticamente, especialmente gases combustibles que puedan quemarse en motores del ciclo de Otto o complementar motores del ciclo de diésel para mover un generador eléctrico (planta eléctrica) movido por gases de pirólisis para cargar baterías que puedan ser utilizadas en el transporte eléctrico de canoas y pequeñas embarcaciones.

Por otra parte el desarrollo de este proyecto de investigación pretende iniciar un proceso de mitigación sobre la dependencia de la zona de la gasolina; así mismo plantear oportunidades de ahorro para la zona, ya que el traslado de combustibles fósiles (gasolina) hasta estas zonas aisladas tiene un costo monetario elevado, además de la oportunidad de desarrollo e integración de nuevas tecnologías en estas comunidades con el fin de mejorar sus niveles de vida y aportando de manera significativa al desarrollo de la región, dejando un precedente que puede ser implementado y puesto en práctica en otras zonas no interconectadas del país.

⁷ *Ibíd.*, párr. 15

⁸ HELVETAS, Swiss Intercooperation and Right Resources. Territorio Indígena y Gobernanza. [Consultado el 05 de marzo del 2018]. Disponible en: http://www.territorioindigenaygobernanza.com/col_14.html

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Evaluar la producción de gas y líquido combustible mediante el proceso de pirólisis de madera, para aplicación en la zona del resguardo Yaigoje en el Vaupés Colombiano.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar los tipos de maderas tropicales disponibles en la zona oriental del país.
- Realizar el proceso pirolítico de las maderas identificadas a nivel planta piloto, por medio de un desarrollo experimental.
- Establecer las especificaciones técnicas del proceso de pirólisis de madera.
- Estimar los costos unitarios del proyecto.

1. MADERAS TROPICALES Y SUS CARACTERÍSTICAS

Según la unidad de planeación minero energética de Colombia⁹ las fuentes de biomasa del sector forestal e industria maderera en Colombia, generan 1,9 megatoneladas de residuos al año, que se pueden usar para la producción de energía ya que mediante la implementación de procesos modernos de conversión termoquímica “se puede generar energía térmica o eléctrica a gran escala, enfocados hacia la sustitución de combustibles fósiles”¹⁰.

La disponibilidad de residuos madereros naturales como los que ruedan y caen por los ríos de Colombia o aquellos que se acumulan en las orillas de algunas playas del país, hacen parte de una amplia oferta de biomasa que puede ser aprovechada para la producción de energía mediante la implementación de procesos de conversión termoquímicos como la pirólisis.

Con el objetivo de conocer la disponibilidad de biomasa (madera), predominante en el país, en especial en el sector del resguardo Yaigojé Apaporis ubicado en el Vaupés Colombiano, en el presente capítulo se identificarán los tipos de madera predominantes en la región oriental del país y sus principales características, además se identificarán de manera teórica los parámetros y características más relevantes que deben tenerse en cuenta para maderas con fines de conversión termoquímica, para finalmente evaluar algunas propiedades fisicoquímicas de interés de maderas tropicales mediante una caracterización de estas a nivel laboratorio.

1.1 LA MADERA COMO FUENTE DE ENERGÍA

“La madera es un material anisotrópico encontrado como principal contenido del tronco de un árbol (...). Como la madera la producen y utilizan las plantas con fines estructurales, es un material muy resistente y gracias a esta característica y a su abundancia natural, es utilizada ampliamente por los humanos, ya desde tiempos muy remotos”¹¹.

“Los residuos de procesos forestales son una importante fuente de biomasa que actualmente es poco explotada en el área centroamericana. Se considera que, de

⁹ UNIDAD DE PLANEACION MINERO ENERGÉTICA – UPME. Potencialidades de los cultivos energéticos y residuos agrícolas en Colombia. Citado por ATUESTA BOADA, Luis Eduardo y SIERRA VARGAS, Fabio Emiro. Caracterización físico-química de pellets producidos a partir de mezclas 50/50 carbón bituminoso/madera residual. En: Informador técnico. Bogotá, 2015. p. 19.

¹⁰ ATUESTA BOADA, Luis Eduardo y SIERRA VARGAS, Fabio. Caracterización físico-química de pellets producidos a partir de mezclas 50/50 carbón bituminoso/madera residual. En: Informador Técnico. Jun 30, vol. 79. p. 18.

¹¹ PAZ FONG, Francisco José. Determinación de la composición química de la madera obtenida del primer clareo en árboles de melina (*gmelina arborea roxb.*), de una plantación proveniente del departamento de izabal. Trabajo de grado Ingeniero químico. Guatemala: Universidad de san Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería química, 2008. p. 1.

cada árbol extraído para la producción maderera, sólo se aprovecha comercialmente un porcentaje cercano al 20%. Se estima que un 40% es dejado en el campo, en las ramas y raíces, a pesar de que el potencial energético es mucho mayor¹².

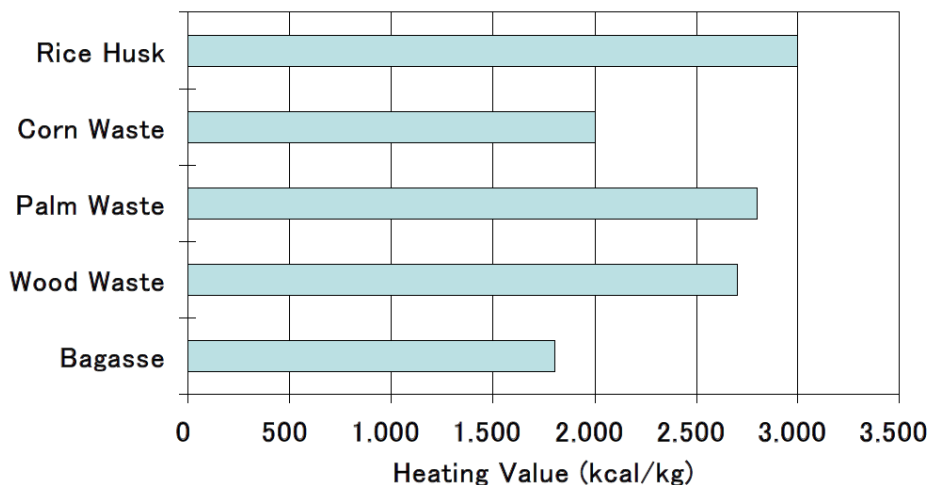
Tabla 1. Distribución energética de un árbol.

Parte del árbol	% Energía
Hojas	1-6
Ramas	6-22
Tronco	74-80
Corteza	3-16
Raíces	21-33

Fuente: BUN-CA. Manuales Sobre Energía renovable BIOMASA. San José, Costa Rica: Bun-ca, 2002. 8 p.

La madera es considerada entonces como una fuente de biomasa ya que “funciona como una especie de batería que almacena la energía solar”¹³; Una vez la madera esta seca puede ser utilizada para numerosas aplicaciones, entre ellas, ser tratada para ser aprovechada energéticamente mediante procesos de conversión termoquímicos o bioquímicos, para la producción de gas, etanol, electricidad, carbón vegetal, entre otros productos de valor energético, ya que como se puede observar en la figura 1, esta cuenta con un potencial energético aprovechable, de cerca de 2700 kcal/kg.

Figura 1. Densidades energéticas de diferentes fuentes de biomasa.



Fuente: LIENQUEO C., Maria Elena. Caracterización de la Biomasa. [Diapositivas]. Chile, 2010.

¹² BUN-CA. Manuales Sobre Energía renovable BIOMASA. 1 ed. San José, Costa Rica: Bun-ca, 2002. p. 6.

¹³ *Ibid.*, p. 6.

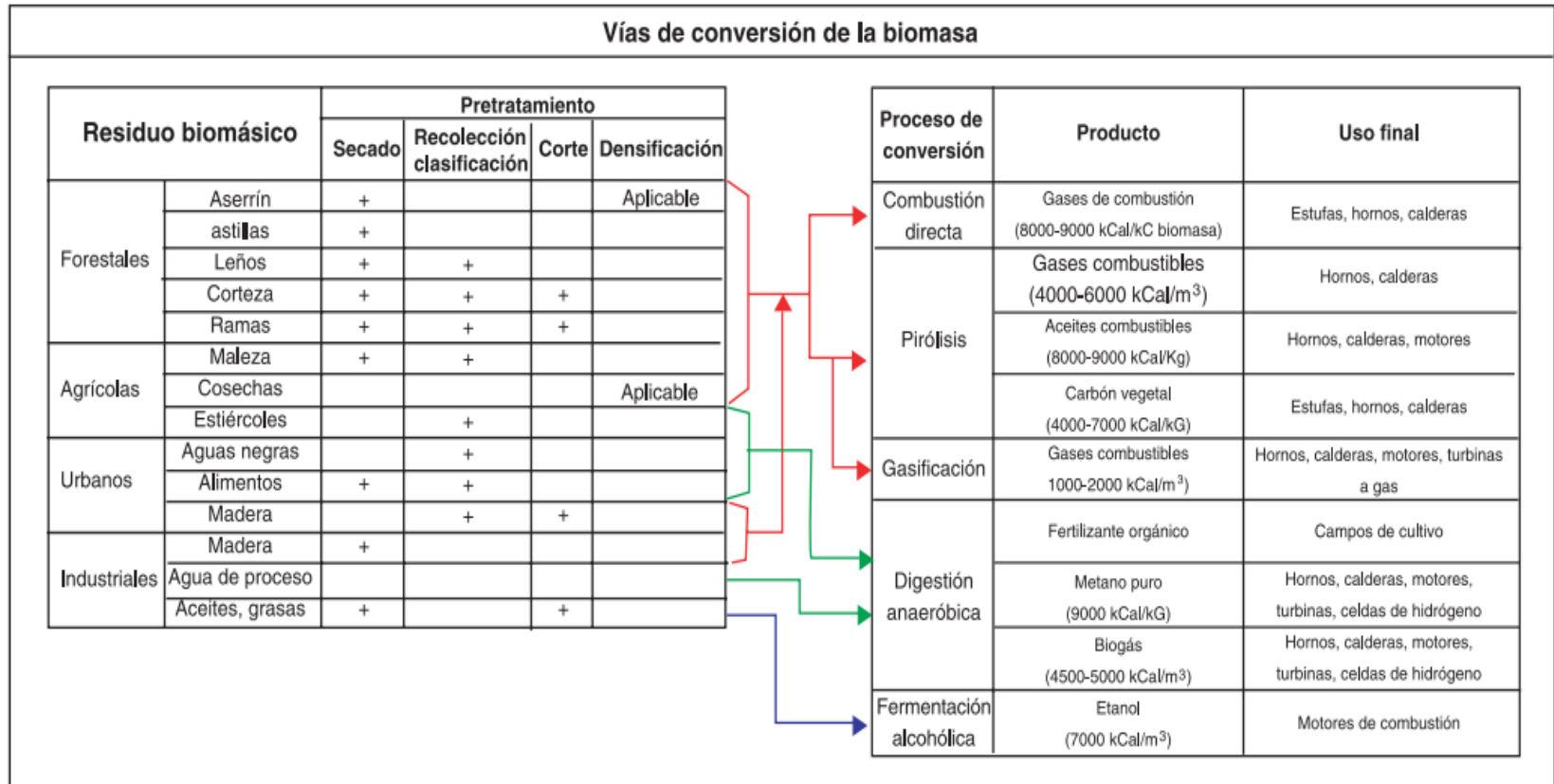
1.2 PROCESOS DE TRANSFORMACIÓN DE BIOMASA

Según BUN-CA¹⁴, antes de que la biomasa, en este caso la madera pueda ser usada para fines energéticos, esta debe ser transformada en una forma más conveniente para su utilización y transporte. En la figura 2 se pueden observar los principales procesos de conversión de biomasa y sus posibles usos energéticos. Estos procesos de transformación se pueden dividir en tres principales:

- Procesos de combustión directa.
- Procesos termoquímicos.
- Procesos bioquímicos.

¹⁴ Ibid., p. 12.

Figura 2. Vías de conversión de diferentes residuos biomásicos.



Fuente: BUN-CA. Manuales Sobre Energía renovable BIOMASA. San José, Costa Rica: Bun-ca, 2002. p 51.

1.2.1 Procesos de combustión directa. Este tipo de proceso de conversión de biomasa según Carrasco¹⁵, consiste básicamente en la oxidación directa de la biomasa o sus biocombustibles hasta dióxido de carbono y agua. Este proceso se lleva a cabo a altas temperaturas en presencia de un agente oxidante (oxígeno); en la realidad la combustión de la biomasa se da en presencia de un exceso de oxígeno y transcurre con la liberación de energía en forma de calor, cuyos principales productos son el dióxido de carbono (CO₂), agua (en forma de vapor) y sales minerales las cuales constituyen las cenizas.

1.2.2 Procesos termoquímicos. Los procesos de conversión termoquímica de biomasa, se “basan en la utilización del calor como fuente de transformación de la biomasa. Están muy desarrollados para la biomasa seca, sobre todo para la paja y la madera”¹⁶. Existen básicamente 2 tipos de procesos de conversión termoquímica de biomasa: la pirólisis y la gasificación.

1.2.2.1 Pirólisis. La pirólisis es un proceso de “degradación térmica de la biomasa en ausencia de un agente oxidante, en donde los principales productos provienen de los tres principales componentes de la biomasa (celulosa, hemicelulosa y lignina)”¹⁷, siendo la lignina la que más aporta a la formación de carbón vegetal. De este proceso se obtendrán 3 productos, uno sólido, uno líquido y uno gaseoso, los 3 podrán ser aprovechados energéticamente, como se puede observar en la figura 3.

✓ **Gases incondensables (producto gaseoso).** Este producto pirolítico, está conformado principalmente según Castells y Velo¹⁸, por las moléculas más pequeñas que se separan de las cadenas carbonadas de la biomasa; es decir de compuestos de uno a cuatro carbonos como el metano (CH₄), el propano (C₃H₈) y el butano (C₄H₁₀); además de gases no pirolíticos como el hidrógeno (H₂), el dióxido de carbono (CO₂) y el monóxido de carbono (CO).

✓ **Aceite (producto líquido).** El producto líquido de la pirólisis según Castells y Velo¹⁹, contiene moléculas de hasta treinta y cinco carbonos, correspondientes a una amplia gama de hidrocarburos como: parafinas, olefinas, ceras, aromáticos y naftenos; estos compuestos pasan a la fase de vapor como consecuencia de las altas temperaturas de operación del reactor y quedan en fase líquida al condensarse.

¹⁵ CARRASCO GARCIA Juan, E. Combustión directa de la biomasa. Master en energías renovables y mercado energético. EOI. Modulo: Biomasa, 2007. p. 15

¹⁶ ENERGIZA. Procesos de conversión de Biomasa en energía. [Sitio web]. [Consultado el 26 de marzo de 2018]. Disponible en: <http://www.energiza.org/index.php/biomasa-2/56-procesos-de-conversion-de-biomasa-en-energia>.

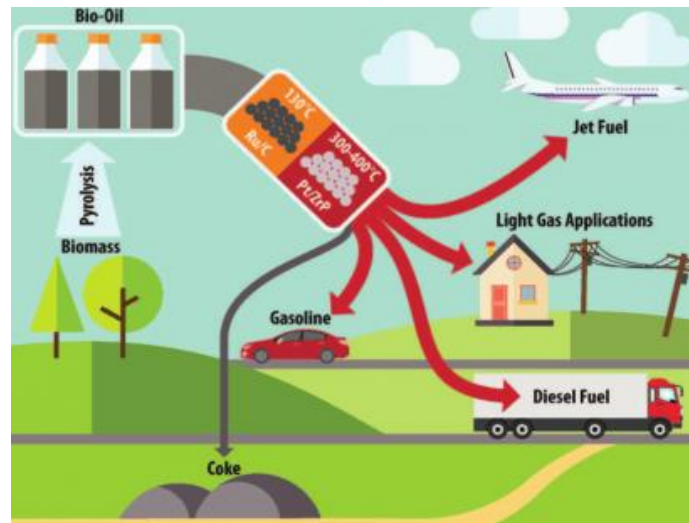
¹⁷ SILVA LORA, Electo Eduardo y RINCÓN MARTÍNEZ, José María. Bioenergía Fuentes, Conversión y Sustentabilidad. Bogotá, Colombia: Red Iberoamericana de Aprovechamiento de Residuos Orgánicos en Producción de Energía, 2014. p. 191. ISBN 978-958-58880-0-5

¹⁸ CASTELLS, Xavier Elías y VELO GARCÍA, Enric. La pirólisis. Tratamiento y valorización energética de residuos. Ediciones Díaz de Santos. España. 2013. p. 88.

¹⁹ *Ibid.*, p. 88.

✓ **Carbonilla (producto sólido).** El producto sólido de la pirólisis conocido como carbonilla hace referencia según Castells y Velo²⁰, a la fracción de hidrocarburos más pesada de la biomasa la cual no se logra convertir en vapor durante el proceso, por lo que no sale ni como aceite ni como gas. Este producto sólido (Biochar) es una masa negra que queda dentro del reactor una vez el proceso ha finalizado.

Figura 3. Pirólisis de biomasa y aplicaciones.



Fuente: RICO, Javier. Veinte Artículos Para Conocer Qué Se Hace En Todo El Mundo Sobre Pirólisis De La Biomasa. Energías renovables [Sitio web]. [Consultado: 10 abril 2018] Disponible en: <https://www.energiarenovables.com/biomasa/veinte-articulos-para-conocer-que-se-hace-20170116>

Existen diferentes tipos de pirólisis, con base principalmente en las tasas de calentamiento que se manejan; entre los procesos más conocidos de pirólisis se encuentra la pirólisis convencional o lenta, pirólisis rápida, pirólisis flash y pirólisis al vacío.

- **Pirólisis convencional o lenta.** Este proceso según Silva y Rincón²¹, puede efectuarse a temperaturas de alrededor de 500°C, con velocidades o tasas de calentamiento de 0,1-1 °C s⁻¹, generando sólidos, líquidos y gases en proporciones similares; suelen tenerse largos tiempos de residencia en donde los gases tienen la oportunidad de seguir reaccionando para formar el carbón.

²⁰ Ibid., p. 88.

²¹ SILVA LORA, Electro Eduardo y RINCON MARTINEZ, José María. Bioenergía fuentes, conversión y sustentabilidad. Bogotá D.C: Red Iberoamericana de Aprovechamiento de Residuos Orgánicos en Producción de Energía, 2014. p. 193. ISBN 978-958-58880-0-5.

- **Pirólisis rápida.** Este proceso según Energiza²², es una variante de la pirólisis, realizado a una temperatura mayor, (alrededor de 1.000 °C); este método de conversión termoquímica de biomasa tiene la ventaja de asegurar una gasificación casi total de la biomasa, optimizando el gas pobre, el cual puede ser utilizado directamente para las operaciones de calentamiento del reactor o puede servir como base para la síntesis por ejemplo de metanol, el cual podría sustituir a las gasolinas para la alimentación de los motores de explosión.
- **Pirólisis flash.** Este tipo de pirólisis puede considerarse una versión mejorada de la pirólisis rápida, en la cual “las tasas de calentamiento son muy altas (>1000°Cs⁻¹), con tiempos de reacción de pocos a varios segundos y altas temperaturas (800-1000°C), permitiendo obtener una pequeña fracción de material sólido (10%) y un 60% de un gas rico en hidrogeno y monóxido de carbono”²³.
- **Pirólisis al vacío.** Este tipo de pirólisis según Silva Lora²⁴, produce altos rendimientos de aceite pirolítico; Contrario al proceso de pirólisis rápida en la pirólisis al vacío el calentamiento es lento (2-4°C/min) y se emplean presiones entre los 5 y 15 kPa.

1.2.2.2 Gasificación. “La gasificación es la conversión de la biomasa en una mezcla de gases combustibles (O, H₂, CH₄) en condiciones de suministro controlado de oxígeno”²⁵. Es decir es un proceso de combustión incompleta de la biomasa que según Energiza²⁶, es efectuado a altas temperaturas (700-1200°C), en donde como producto principal se obtiene un gas combustible compuesto básicamente por hidrógeno, metano y monóxido de carbono; El poder calorífico de este gas, se sitúa en torno a los 16 MJ/m³.

1.2.3 Procesos bioquímicos. En estos procesos de conversión, se utilizan “las propiedades bio-químicas y la acción metabólica de organismos microbiales para producir combustibles gaseosos y líquidos”²⁷; los principales procesos de conversión bioquímicos son: digestión anaerobia y fermentación.

1.2.3.1 Digestión anaerobia. “Es un proceso biológico complejo y degradativo en el cual parte de los materiales orgánicos de un substrato son convertidos en biogás”²⁸; este biogás es una mezcla de dióxido de carbono y metano, con trazas

²² ENERGIZA. Procesos de conversión de Biomasa en energía. [Sitio web]. [Consultado el 26 de marzo de 2018]. Disponible en: <http://www.energiza.org/index.php/biomasa-2/56-procesos-de-conversion-de-biomasa-en-energia>.

²³ SILVA LORA. Op. cit., p. 194.

²⁴ *Ibid.*, p. 194.

²⁵ *Ibid.*, p. 332.

²⁶ ENERGIZA. Op. Cit., párr. 17.

²⁷ *Ibid.*, párr. 22.

²⁸ ESCOBAR PALACIO, José Carlos, et al. Procesos Biológicos de conversión. En: Bioenergía: Fuentes, conversión y sustentabilidad, 2015. p. 128

de algunos otros elementos; ese proceso degradativo se da gracias al trabajo que realizan unas bacterias anaerobias.

1.2.3.2 Fermentación. Básicamente este proceso consiste en la “conversión de la glucosa y otros azúcares en etanol, por la acción de micro-organismos”²⁹. Este proceso se da mediante una sucesión de reacciones biológicas complejas.

1.3 PIRÓLISIS DE MADERA

La pirólisis de madera es un proceso que en la actualidad “es una ruta prometedora para convertir los residuos agrícolas o forestales en biocombustible en ausencia de oxígeno a una temperatura entre 450 y 550 ° C”³⁰, por medio de este proceso se da la “formación de los productos gaseosos y líquidos (incluso alquitrán de árbol), así como del residuo sólido, que es carbón vegetal”³¹. Para realizar el proceso de pirólisis, en la actualidad según Greenpower³², se aplican habitualmente maderas de las variedades foliáceas y maderas de las variedades coníferas.

“La variedad, calidad y humedad de la madera determinan rendimiento de sus productos de pirólisis. Con la subida de la temperatura crece el rendimiento del alquitrán de árbol y de los gases no condensables, pero baja el rendimiento del carbón vegetal, del ácido acético y de los productos de alcohol; el carbón se forma con un más alto porcentaje del carbono”³³; Por otra parte los rendimientos medios para los productos de pirólisis partiendo de madera seca como fuente de alimentación al proceso se pueden aproximar según Greenpower³⁴, a 5-7% de ácido acético, 10-14% de alquitrán de árbol y 23-24% de carbón vegetal.

Numerosos estudios se han realizado hasta la fecha sobre pirólisis partiendo de madera; entre estos se pueden destacar el estudio pirólisis un proceso para derretir biomasa, en el cual Klug³⁵ afirma que existen diferentes tipos de pirólisis y cada uno de ellos tendrá diferentes condiciones de proceso lo cual favorecerá la generación de diferentes productos como se puede observar en la tabla 2.

Se menciona además que el secado de la materia prima debe ser un proceso riguroso que asegure la mínima cantidad de agua en los productos líquidos y

²⁹ *Ibíd.*, p. 140.

³⁰ QING Liu, et al. Pyrolysis of different wood species: Impacts of C/H ratio in feedstock on distribution of pyrolysis products. [En línea] En: ELSEVIER. p. 28. Consultado en 22 de diciembre del 2018]. Disponible en: <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0961953418302873?token=0A4E18E93E30A3A34CF4BBF2B82C8B0B219F2EE1621DFD60E3F969603F3311D773E964F9F4ACFD6763F35DD757D186D4>

³¹ GREENPOWER. [Sitio web]. Pirólisis de la madera (Destilación de madera). [Consultado en 28 de diciembre del 2018]. Disponible en: <http://carboneros.org/clients/articles/woodpyrolysis/esp/>

³² *Ibíd.*, párr. 3.

³³ *Ibíd.*, párr 6.

³⁴ *Ibíd.*, párr 6.

³⁵ KLUG Michael. Pirólisis, un proceso para derretir la biomasa. Revista De Química PUCP. vol. 26. [En línea]. 2012, p. 37. [Consultado 28 de diciembre 2018]. ISSN 10123946. Disponible en: <http://revistas.pucp.edu.pe/index.php/quimica/article/viewFile/5547/5543>.

gaseosos y que además procesos de molienda en donde se obtengan tamaños de partícula pequeños aseguran reacciones más rápidas por lo tanto menores tiempos de residencia dentro del reactor; Por otra parte se tiene que “una de las principales ventajas de este proceso es que, en teoría, cualquier forma de biomasa podría ser considerada para un proceso de pirólisis”³⁶.

Por otra parte, se afirma que el corazón del proceso es el reactor y este deberá cumplir una serie de condiciones para ser apto para ser utilizado en un proceso de pirólisis, entre estas se encuentra que se cuenta con una atmosfera sin oxígeno y rangos de temperatura que vayan desde 400 hasta 600°C.

Tabla 2. Rendimiento típico de los productos (base madera seca) obtenidos por los diferentes modos de pirólisis.

Modo	Condiciones	Líquido %	Carbón %	Gas %
Gasificación	800°C	5	20	85
Flash	500°C, corto tiempo de residencia (1s)	75	12	13
Intermedio	500°C, tiempo de residencia 10-30 s	50	25	25
Carbonización lenta	400°C, largo tiempo de residencia horas-días	30	35	35
Torrefacción lenta	290°C, tiempo de residencia 30 min	---	82	18

Fuente: Modificado por el autor con base en KLUG Michael. Pirólisis, un proceso para derretir la biomasa. Revista De Química PUCP. vol. 26. [En línea]. 2012, p. 38. [Consultado 28 de diciembre 2018]. ISSN 10123946. Disponible en: <http://revistas.pucp.edu.pe/index.php/quimica/article/viewFile/5547/5543>.

En cuanto a la composición del gas se tiene que esta puede “variar fuertemente dependiendo de la materia prima y las condiciones del proceso; los componentes típicos son: nitrógeno y dióxido de carbono hasta un 60%, hidrogeno hasta un 5%, monóxido de carbono hasta un 35% e hidrocarburos superiores hasta un 10%”³⁷.

“El proceso de pirólisis de la madera conduce al rendimiento de diferentes cantidades de gas, líquido y carbón, según las condiciones de operación, fundamentalmente velocidad de calentamiento y temperatura final”³⁸. Cuando el carbón es el principal producto a obtener, la pirólisis debe efectuarse a bajas velocidades de calentamiento y temperaturas finales moderadas, contrario si lo que se desea maximizar es la producción del líquido; en cuanto al gas, este se favorecerá a altas temperaturas y bajas velocidades de calentamiento.

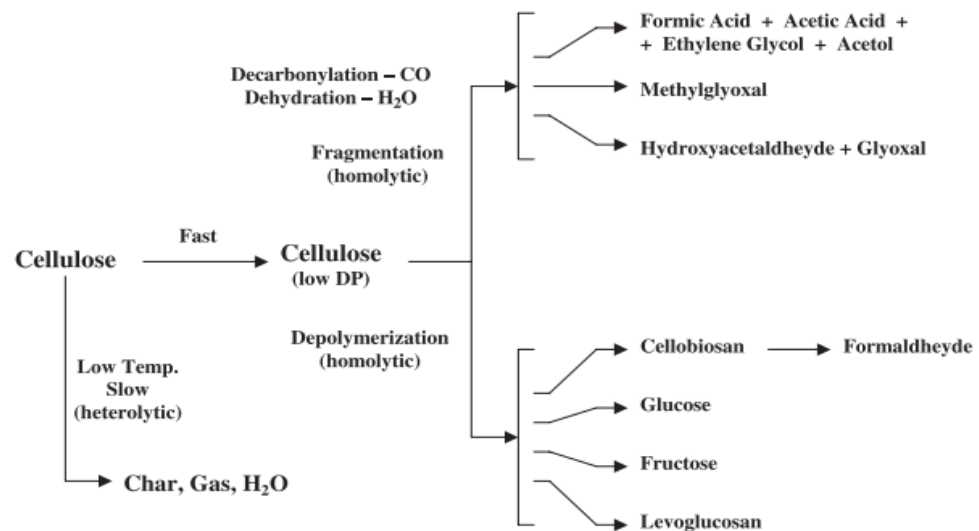
³⁶ *Ibíd.*, p 38.

³⁷ *Ibíd.*, p. 38.

³⁸ MÁRQUEZ MONTESINO Francisco. Transformación térmica de la madera. [Sitio web]. [Consultado en 29 de diciembre del 2018]. Disponible en: <https://www.monografias.com/trabajos15/transformacion-madera/transformacion-madera.shtml>

Adicionalmente varios estudios sobre pirólisis de madera se han centrado en el estudio de las rutas y mecanismos de descomposición que sufre la madera para la formación de los 3 productos principales de la pirólisis (sólido, líquido y gas); en la figura 4 se observa de manera general la degradación del componente principal de la madera, la celulosa en los diferentes productos del proceso por acción básicamente de calor, es decir la formación de los productos se dará gracias a una degradación térmica de la madera.

Figura 4. Descomposición de la celulosa en los diferentes productos de la pirólisis.



Fuente: DI BLASI Colomba. Modeling chemical and physical processes of wood and biomass pyrolysis. En: ELSEVIER. vol. 34, p. 47-90

Como se puede observar en la figura 4, adicional a los productos principales del proceso de pirólisis, se da la formación de compuestos secundarios como ácidos, alcoholes y compuestos aromáticos producto de procesos básicamente de fragmentación de los compuestos primarios por acción de calor.

1.4 YAIGOJÉ APAPORIS

Según Parques Nacionales Naturales de Colombia³⁹, Yaigojé Apaporis es un territorio indígena ubicado en los departamentos Amazonas y Vaupés en el corazón de la Amazonía Colombiana; es un parque natural cerrado al público creado en el año 2009, con un clima húmedo tropical de temperatura promedio de 27°C, una altura de 100-120 msnm (aprox) y una extensión de 1'055.740 hectáreas (ver figura 5).

³⁹ PARQUES NACIONALES NATURALES DE COLOMBIA. [Sitio web]. Parque Nacional Natural Yaigojé Apaporis. Ministerio de ambiente. [Consultado el 11 de Julio de 2018]. Disponible en: <http://www.parquesnacionales.gov.co/porta/es/parques-nacionales/parque-nacional-naturalyaigoje-apaporis/>

Figura 5. Ubicación Yaigojé Apaporis



Fuente: HELVETAS Swiss Intercooperation y Right Resources. Territorio Indígena y Gobernanza. [Sitio web]. [Consultado el 05 de marzo del 2018]. Disponible en: http://www.territorioindigenaygobernanza.com/col_14.html

Los titulares de este parque natural “son 19 comunidades indígenas de las etnias Makuna, Yakuna, Tanimuka, Matapí, Tatuyo, Tuyuca, Letuama, Cabiari, Barasano, Yujup-macú, Yauna y Bora Miraña”⁴⁰, de ellas, las comunidades Makuna y Yakuna, son las 2 etnias con las que se trabajó y desarrollo el proyecto de investigación.

1.4.1 Maderas tropicales, Yaigojé Apaporis. Para realizar la identificación de los tipos de madera predominantes que se podrían encontrar en la región del resguardo Yaigojé provenientes del río Apaporis, se realizó un barrido bibliográfico consultando diferentes autores, con el fin de determinar los tipos de madera principales que se encuentran a lo largo del oriente y sur del país identificando como característica principal la densidad de cada tipo de madera reportada. Entre los principales tipos de maderas tropicales predominantes en la zona anteriormente descrita, según World Wildlife Fund (WWF) en su publicación maderas de Colombia, se encuentran:

Abarco del Amazonas⁴¹: Densidad básica: 0,59 g/ml; Distribución geográfica: Se encuentra en la Amazonia colombiana, peruana y brasileña.

Aceituno⁴²: Densidad básica: 0,36 g/ml; Distribución geográfica: Se encuentra desde Cuba, Guatemala, Costa Rica, Panamá, Antillas Menores, Guyana, Brasil,

⁴⁰ HELVETAS Swiss Intercooperation y Right Resources. Territorio Indígena y Gobernanza. [Sitio web]. [Consultado el 05 de marzo del 2018]. Disponible en: http://www.territorioindigenaygobernanza.com/col_14.html

⁴¹ AGUDELO DELGADO, Mario Andrés. Maderas De Colombia. [En línea]. WWF. Colombia, 2013. p. 7-8. ISBN 978-958-8353-54-8. [Consultado en 05 de marzo del 2018]. Disponible en: http://d2ouvy59p0dg6k.cloudfront.net/downloads/maderas_de_colombia_15_version_aprobada.pdf

⁴² *Ibid.*, p. 10-11

Venezuela, Ecuador, Perú hasta Bolivia. En Colombia se halla en el Bajo Vaupés, Amazonia, Magdalena Medio, Tumaco, Sarare (Arauca), Putumayo, Caquetá, Huila, Antioquia (ríos Porce y Cocorná) y Tolima.

Achapo⁴³: Densidad básica: 0,37 g/ml; Distribución geográfica: Se encuentra desde Brasil, Ecuador y hasta Perú. En Colombia se halla en la Amazonia Central, Nariño y Putumayo.

Algarrobo-roble⁴⁴: Densidad básica: 0,78 g/ml; Distribución geográfica: Se encuentra en la Amazonia colombiana y peruana.

Almendro⁴⁵: Densidad básica: 0,69 g/ml; Distribución geográfica: Se encuentra desde Suriman, Guayana Francesa, Guayana, Brasil, Venezuela hasta Perú. En Colombia se halla en el valle del Magdalena Medio (Carare, Opón y serranía de San Lucas), valle de los ríos Cauca y Calima, sur del Chocó, zona de Tumaco, Vaupés, y El Sarare, en Arauca.

Andiroba⁴⁶: Densidad básica: 0,49 g/ml; Distribución geográfica: Se encuentra desde Cuba, Honduras, Costa Rica, Trinidad y Tobago, Guyana, Surinam, Brasil, Venezuela, Ecuador hasta el Perú. En Colombia se halla en el Atrato y Bajo Baudó (Chocó), y Tarapacá (Amazonas).

Arenillo⁴⁷: Densidad básica: 0,47 g/ml; Distribución geográfica: Se encuentra desde las Guyanas, Brasil, Venezuela hasta Bolivia. En Colombia se halla en Amazonia y en los departamentos del Caquetá y Arauca.

Caimito⁴⁸: Densidad básica: 0,74 g/ml; Distribución geográfica: Se encuentra desde México, Ecuador, Perú, Brasil hasta Bolivia. En Colombia se halla en la zona de Urabá, la Amazonia, la costa Pacífica, el Magdalena Medio, el Bajo Calima y el Chocó.

Canalete⁴⁹: Densidad básica: 0,35 g/ml, Distribución geográfica: Se encuentra desde Costa Rica, Venezuela hasta Brasil. En Colombia se halla en la región de Urabá, Caquetá, Magdalena Medio, Tolima, Nariño, Huila, Chocó, Vaupés, Putumayo, Amazonas, Santander y Arauca.

⁴³ Ibid., p. 13-14

⁴⁴ Ibid., p. 17-18

⁴⁵ Ibid., p. 19-20

⁴⁶ Ibid., p. 21-22

⁴⁷ Ibid., p. 23-24

⁴⁸ Ibid., p. 29-30

⁴⁹ Ibid., p. 33-34

Capirón⁵⁰: Densidad básica: 0,74 g/ml; Distribución geográfica: Se encuentra desde Brasil, Perú, Ecuador hasta Bolivia. En Colombia se halla en la Amazonia, zona de Urabá, Bajo del Cauca y Bajo Magdalena.

Castaño blanco⁵¹: Densidad básica: 0,60 g/ml; Distribución geográfica: Se encuentra en la Amazonia colombiana y brasileña.

Castaño rojo⁵²: Densidad: 0,61 g/ml; Distribución geográfica: Se encuentra en la Amazonia colombiana y brasileña.

Chonta⁵³: Densidad: 1,03 g/ml; Distribución geográfica: Se distribuye desde Nicaragua hasta el norte de Suramérica, pasando por toda la región amazónica. En Colombia se encuentra en Tarapacá donde es una especie abundante.

Creolino⁵⁴: Densidad básica: 0,78 g/ml; Distribución geográfica: Se encuentra en la Amazonia en Colombia, Venezuela, Perú y el norte de Brasil.

Cumala⁵⁵: Densidad básica: 0,37 g/ml; Distribución geográfica: Se encuentra desde las Antillas Menores, Guyana, Surinam, Venezuela, Ecuador, Perú hasta Brasil. En Colombia se halla en la costa Pacífica, alrededores del río Porce, Caucasia, San Carlos, San Rafael, regiones secas y estuarios de la costa Atlántica, Magdalena Medio y Amazonas.

Gomo⁵⁶: Densidad básica: 0,34 g/ml; Distribución geográfica: Se encuentra en la Amazonia colombiana y peruana.

Lechero Amarillo⁵⁷: Densidad básica: 0,63 g/ml; Distribución geográfica: Se encuentra en la Amazonia colombiana, peruana y brasileña.

Ojé⁵⁸: Densidad básica: 0,32 g/ml; Distribución geográfica: Se encuentra desde México, América Central, Antillas menores, Colombia, Venezuela, Guyana, Surinam, Guayana Francesa, Ecuador, Perú, Brasil y Bolivia.

Palo Sangre⁵⁹: Densidad básica: 1,10 g/ml; Distribución geográfica: La especie se distribuye a lo largo de la cuenca Amazónica de Colombia, Perú, Brasil y Guyana, con algunos reportes en Panamá.

⁵⁰ Ibid., p. 35-36

⁵¹ Ibid., p. 41-42

⁵² Ibid., p. 43-44

⁵³ Ibid., p. 49-50

⁵⁴ Ibid., p. 51-52

⁵⁵ Ibid., p. 55-56

⁵⁶ Ibid., p. 57-58

⁵⁷ Ibid., p. 65-66

⁵⁸ Ibid., p. 67-68

⁵⁹ Ibid., p. 69-70

Peinemono⁶⁰: Densidad básica: 0,30 g/ml; Distribución geográfica: Se encuentra desde Panamá, Brasil, Venezuela, Ecuador hasta Perú. En Colombia se halla en Chigorodó (Antioquia), Putumayo (Putumayo), Bajo Baudó (Chocó) y Tarapacá (Amazonas).

Perillo⁶¹: Densidad básica: 0,51 g/ml; Distribución geográfica: Se encuentra desde América Central, Panamá, Brasil, Venezuela hasta el Perú. En Colombia se halla en el Carare Opón, serranía de San Lucas, Amazonia, Caquetá, Chocó, Sarare (Arauca), Bajo Calima y Vaupés.

Quinilla⁶²: Densidad básica: 0,87 g/ml; Distribución geográfica: Se encuentra desde las Indias Occidentales, Puerto Rico, Costa Rica, Panamá, Venezuela, las Guyanas, Surinam, Brasil hasta el Perú. En Colombia se encuentra en la Amazonia, Magdalena Medio, Chocó, Bajo Putumayo y Vaupés.

Sande⁶³: Densidad básica: 0,42 g/ml; Distribución geográfica: En Colombia se encuentra en el Atrato (Chocó), Chigorodó (Antioquia), Putumayo, Alto Guapi (Cauca); Bajo Baudó (Chocó); Tarapacá (Amazonas) y Monte Bravo.

Soroga⁶⁴: Densidad básica: 0,37 g/ml; Distribución geográfica: Se encuentra desde Nicaragua, Costa Rica, Panamá, Surinam, Guyana, Venezuela, Ecuador, Brasil hasta Perú. En Colombia se halla en el Magdalena Medio, la Amazonia, Valle del Atrato, Caquetá, costa Pacífica (Buenaventura) y Antioquia (San Carlos, San Rafael, Río Claro).

Yanchama Roja⁶⁵: Densidad básica: 0,37 g/ml; Distribución geográfica: El bálsamo se encuentra desde México, El Salvador, Panamá, Colombia, Venezuela, Brasil, hasta Perú y Argentina.

Por otra parte, según el Manual de identificación de especies maderables objeto de comercio en la Amazonia colombiana⁶⁶, se identificaron otras especies características de la región en cuestión, entre las cuales se encuentran:

Ahumado⁶⁷: Densidad básica: 0.935 g/ml; Distribución geográfica: En Amazonia colombiana la especie ha sido registrada en los departamentos de Guaviare, Caquetá, Putumayo y Amazonas.

⁶⁰ Ibid., p. 71-72

⁶¹ Ibid., p. 73-74

⁶² Ibid., p. 75-76

⁶³ Ibid., p. 79-80

⁶⁴ Ibid., p. 81-82

⁶⁵ Ibid., p. 85-86

⁶⁶ LÓPEZ CAMACHO, René y CÁRDENAS LÓPEZ, Dairón. Manual De Identificación de especies maderables objeto de comercio en la Amazonia Colombiana. Bogotá, D.C: Ministerio del Medio Ambiente de Colombia y el Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas SINCHI, 2002. ISBN 958-97235-6-X

⁶⁷ Ibid., p. 28-29

Cachicamo⁶⁸: Densidad básica: 0.55 g/ml; Distribución geográfica: En la Amazonia colombiana la especie ha sido registrada en el Parque Nacional Natural Chiribiquete y Araracuara (Caquetá), en el sector de Tomachipán (Guaviare), en cercanías a Mitú (Vaupés) y en la Chorrera (Amazonas).

Caracol⁶⁹: Densidad básica: 0.50 - 0.75 g/ml; Distribución geográfica: Tiene una amplia distribución en América del Sur encontrándose en Brasil, Perú y Colombia. En la Amazonia colombiana ha sido registrada en los sectores del Parque Nacional Natural Chiribiquete, Araracuara (Caquetá); río Vaupés, Taraira, Estación Biológica de Caparú (Vaupés); Rumiaco, Serranía de El Churumbelo, Lagarto Cocha (Putumayo); Leticia, Pto. Nariño y Parque Nacional Natural Cahuinarí (Amazonas).

Macano⁷⁰: Densidad básica: 0.73 g/ml; Distribución geográfica: Se encuentra desde México hasta Bolivia. En Amazonia colombiana la especie ha sido registrada en los municipios de Mitú (Vaupés); San José del Guaviare, El Retorno (Guaviare); Tuparro (Vichada); PNN Tinigua (Meta); San Pedro de Tipisca, Tarapacá (Amazonas) y Araracuara (Caquetá).

Sangre Toro⁷¹: Densidad básica: 0.6-0.67 g/ml; Distribución geográfica: En Amazonia colombiana la especie ha sido registrada en el departamento de Amazonas en los sectores correspondientes al Parque Amacayacu, Tarapacá, Puerto Nariño y Leticia y el Parque Cahuinarí.

Tara⁷²: Densidad básica: 0,39 g/ml; Distribución geográfica: El Tara presenta registros botánicos en los sectores de Araracuara (Caquetá); Tarapacá (Amazonas); Mocoa (Putumayo); Tomachipan, Pto Arturo (Guaviare); Parque nacional natural Tinigua, La Macarena (Meta) y río Apaporis (Vaupés).

Finalmente, con base al manual de identificación de especies no maderables del corregimiento de Tarapacá, Colombia⁷³, realizado por el instituto SINCHI, en complemento con el informe de INTI – CITEMA⁷⁴, Densidad de maderas por nombre común, se identificaron algunas especies características de la zona y sus densidades, entre las maderas reportadas se encuentran:

⁶⁸ *Ibid.*, p. 33-34

⁶⁹ *Ibid.*, p. 38-39

⁷⁰ *Ibid.*, p. 51-52

⁷¹ *Ibid.*, p. 59-60

⁷² *Ibid.*, p. 62-63

⁷³ LÓPEZ CAMACHO, René, et al. Manual de identificación de especies no maderables del corregimiento de Tarapacá, Colombia. Bogotá, D.C: Sinchi, 2006. ISBN 9589-795072

⁷⁴ ATENCIA, María Elena. Densidad De Maderas (kg/M3) Ordenadas Por Nombre Común. [En línea], 2003. [Consultado en 5 de agosto de 2018]. Disponible en: https://www.inti.gob.ar/maderaymuebles/pdf/densidad_comun.pdf

Acapú: Densidad básica: 0,4 - 0,91 g/ml⁷⁵; Distribución geográfica: En Colombia se distribuye por los bosques del Magdalena Medio, Urabá, Serranía de San Lucas, Chocó y Arauca; en la Amazonía colombiana la especie ha sido registrada en los departamentos de Guaviare, Caquetá, Putumayo y Amazonas, creciendo en bosques primarios de tierra firme sobre suelos arcillo-arenoso, asociada con especies como guamos (*Inga spp.*), pavito (*Jacaranda copaia*), resbalamono (*Calycophyllum sp.*)⁷⁶.

Cedro: Densidad básica: 0,53 g/ml⁷⁷; Distribución geográfica: En Colombia se encuentra en la costa Pacífica, Valle central del Río Magdalena, Costa Atlántica y en la Amazonía, donde ha sido registrada en los departamentos de Guaviare, Caquetá, Putumayo y Amazonas. Se encuentra principalmente en bosques primarios húmedos⁷⁸.

Ceiba: Densidad básica: 0,43 g/ml⁷⁹; Distribución geográfica: En Colombia se distribuye en los valles de los ríos Magdalena, Cauca y Zulia, en la región de Urabá, en los Llanos Orientales y la Amazonía. Es una especie pionera, de rápido crecimiento, de bosques húmedos y secos tropicales, generalmente en áreas húmedas a lo largo de cuerpos de agua⁸⁰.

Copaiba: Densidad básica: 0,7 g/ml⁸¹; Distribución geográfica: Esta especie se distribuye desde Panamá hasta Brasil y Paraguay, pasando por Venezuela y Las Antillas, desde los 50 m hasta los 300 m de altitud. Se encuentra en bosques deciduos, sabanas de arbustos, bosques de galería y bosques de tierras bajas. En Tarapacá es una especie rara, se encuentran únicamente individuos aislados en zonas de vega inundable⁸².

1.5 PARÁMETROS DE INTERÉS PARA MADERAS CON FINES TÉRMICOS

García Cortes⁸³, en su tesis doctoral, afirma que el espectro de los diferentes productos obtenidos a partir del proceso de pirólisis, dependen de una serie de parámetros de la materia a pirolizar; entre estos aspectos básicamente se encuentran las cenizas, la composición de la biomasa, la densidad, la humedad y el

⁷⁵ *Ibíd.*, p. 1

⁷⁶ LÓPEZ CAMACHO, et al. *Op. cit.*, p. 19-20

⁷⁷ ATENCIA. *Op.*, *cit.*, p. 2

⁷⁸ LÓPEZ CAMACHO, et al. *Op. cit.*, p. 69

⁷⁹ ORGANIZACIÓN INTERNACIONAL DE MADERAS TROPICALES. Cadenas Forestales en Colombia. [En línea]. [Consultado el 3 de agosto del 2018]. Disponible en: http://maderas.ut.edu.co/transformacion/pagina_tra_especie.php

⁸⁰ LÓPEZ CAMACHO, et al. *Op. cit.*, p. 71

⁸¹ ATENCIA. *Op.*, *cit.*, p. 3

⁸² LÓPEZ CAMACHO, et al. *Op. cit.*, p. 85

⁸³ GARCIA CORTEZ, Ángela Nubia. Estudio termoquímico y cinético de la pirólisis de residuos sólidos urbanos. Trabajo de grado Doctor en ciencias químicas. Alicante, España: Universidad de Alicante. Facultad de ingeniería. Departamento de química, 1993. p. 13.

tamaño de partícula, parámetros que afectan directamente el rendimiento y la distribución de los productos obtenidos en el proceso.

1.5.1 Contenido de cenizas. Las cenizas de madera presentan contenidos importantes de diferentes nutrientes como potasio (K), fósforo (P), magnesio (Mg) y calcio (Ca), los cuales se encuentran en formas relativamente solubles⁸⁴; El porcentaje de cenizas es entonces una variable que permite identificar la “fracción de residuos inorgánicos que quedan luego de la ignición u oxidación completa de la materia orgánica”⁸⁵. Con base a esto un mayor porcentaje de cenizas indica que se “reducirá el rendimiento del alquitrán y aumentará la producción de gas y agua”⁸⁶. En conclusión, conocer el contenido de cenizas de una muestra de biomasa a ser pirolizada en este caso de madera, es de suma importancia ya que las cenizas no reaccionarán dentro del reactor por lo tanto se comportarán como un inerte dentro del proceso.

1.5.2 Composición de la Biomasa. “Con respecto a la composición química elemental, no hay ninguna diferencia importante entre los bosques. Los elementos químicos principales de madera son carbono, hidrógeno y oxígeno; las cantidades pequeñas de nitrógeno también están presentes”⁸⁷; Sin embargo en el caso en el que se trabajara con fuentes biomásicas diferentes, el conocer la composición de la biomasa mediante un análisis elemental (CHONS), permite explicar las diferencias cuantitativas existentes en los productos de pirólisis al variar la biomasa utilizada en el proceso, es decir determinar la influencia del tipo de biomasa en la distribución de los productos sólidos, líquidos y gaseosos producidos en la pirólisis.

1.5.3 Densidad de la biomasa. García Cortez⁸⁸ afirma que la densidad es un parámetro que influye directamente en que la pirólisis de algunos materiales produzca más gases que otros, ya que un material de mayor densidad hará que los alquitranes producidos queden retenidos en las partículas durante más tiempo ocasionando que una fracción más alta de estos se convierta en gas; Es decir que “el uso de maderas con densidades bajas para la producción directa de energía en forma de calor implica una quema rápida y una menor producción de energía por

⁸⁴ SOLLA GULLÓN F., RODRÍGUEZ SOALLEIRO R. y MERINO A. Evaluación del aporte de cenizas de madera como fertilizante de un suelo ácido mediante un ensayo en laboratorio. [En línea]: Universidad de Santiago de Compostela, 2001, vol. 16. [Consultado 24 de junio 2018]. Disponible en: http://www.inia.es/GCONTREC/pub/solla_1161156613093.pdf

⁸⁵ CASTRO JIMÉNEZ Diana Catherine. Evaluación Del Proceso De Pirólisis Aplicado Al Material Lignocelulosico Residual Proveniente Del Pino Patula En Atmosfera De Dióxido De Carbono. [En línea]. Tesis de grado. Bogotá, Colombia: UNIVERSIDAD LIBRE DE COLOMBIA, 2018. [Consultado en Julio 15 de 2018]. Disponible en: <https://repository.unilibre.edu.co/bitstream/handle/10901/11025/TRABAJO%20DE%20GRADO%20FINAL%20DIANA%20CATHERINE%20CASTRO%20JIM%C3%89NEZ%20.pdf?sequence=1>

⁸⁶ GARCIA CORTEZ. Op. cit., p. 13

⁸⁷ PAZ FONG, Francisco José. Determinación de la composición química de la madera obtenida del primer claro en árboles de melina (*gmelina arborea roxb.*), de una plantación proveniente del departamento de Izabal. Guatemala: Universidad de san Carlos de Guatemala, 2008. p.7

⁸⁸ GARCIA CORTEZ. Op. cit., p. 14

unidad de volumen, a diferencia de maderas con densidades altas⁸⁹; esto permite concluir que materiales con mayores densidades favorecerán la producción de gas en el proceso de pirólisis, por lo tanto si el objetivo es maximizar la producción de este producto será necesario utilizar materiales densos.

1.5.4 Contenido de humedad. La humedad de la muestra es un parámetro a tener en cuenta en materiales que se utilizaran en procesos de conversión termoquímicos como lo es el proceso de pirólisis, en donde “la pirólisis de partículas húmedas, tiene lugar a temperatura más baja de la fijada puesto que parte del calor suministrado, se emplea en evaporar la humedad de la muestra”⁹⁰, es decir que altos contenidos de humedad en la muestra “favorece la carbonización y disminuye la formación de aceites de modo que aunque su composición cualitativa permanece invariable, se aprecian cambios cuantitativos (disminución en metanol, ácido fórmico, ácido propiónico...)”⁹¹.

1.5.5 Tamaño de partícula. Este parámetro influye de manera significativa sobre el proceso de pirólisis, básicamente en la parte de la transferencia de calor. Scott y Piskorz⁹² realizaron un estudio en donde evaluaron la influencia de 3 tamaños de partícula distintos sobre el rendimiento del proceso pirolítico realizado en un reactor de lecho fluidizado, en este estudio lograron comprobar que un tamaño intermedio producía un alto rendimiento de los alquitranes, permitiendo concluir que partículas muy grandes no se calientan rápidamente y por el contrario partículas muy pequeñas se sobrecalientan o salen arrastradas por el reactor. Por otro lado según Beaumont y Schwob⁹³, al trabajar con partículas de madera de 0.05-0.5 mm se logra un aumento en la producción de carbón y un mayor rendimiento en la producción de gases.

1.5.6 Contenido de celulosa, hemicelulosa y lignina. Es importante conocer el contenido los componentes estructurales en una muestra de biomasa como lo son la celulosa, la hemicelulosa y lignina, ya que según Álvarez, Pizarro y Folgueras⁹⁴, el poder calorífico esta relacionando con mencionada composición estructural en

⁸⁹ LIMA ROJAS, Lizzete. Evaluación De La Composición Química Y Propiedades Físicas De Madera Y Corteza De Cuatro Coníferas Para La Producción De Bioenergía. Linares, Nuevo León: Universidad autónoma de nuevo León, 2013. p. 34.

⁹⁰ Ibid., p. 15

⁹¹ BEAUMONT Y SCHWOB. Influence of Physical and Chemical Parameters on Wood Pyrolysis, Citado por GARCÍA CORTEZ, Ángela Nuria. Estudio Termoquímico Y Cinético De La Pirólisis De Residuos Sólidos Urbanos. Tesis doctoral en Ciencias químicas. España. Universidad de Alicante, 1993. p. 15.

⁹² SCOTT Y PISKORZ. The Flash pyrolysis of Aspen-Polar Wood. Citado por GARCÍA CORTEZ, Ángela Nuria. Estudio termoquímico y cinético de la pirólisis de residuos sólidos urbanos. Tesis doctoral en Ciencias químicas. España. Universidad de Alicante, 1993. p. 17

⁹³ BEAUMONT Y SCHWOB. Influence of Physical and Chemical Parameters on Wood Pyrolysis, Citado por GARCÍA CORTEZ, Ángela Nuria. Estudio termoquímico y cinético de la pirólisis de residuos sólidos urbanos. Tesis doctoral en Ciencias químicas. España. Universidad de Alicante, 1993. p. 18

⁹⁴ ALVARES RRODRIGUEZ, Ana; PIZARRO GARCÍA, Consuelo y FOLGUERAS DIAZ, María Belén. Caracterización química de biomasa y su relación con el poder calorífico. [En línea]. Universidad de Oviedo. 2012. p. 10. [Consultado en de 3 Julio del 2018]. Disponible en: http://digibuo.uniovi.es/dspace/bitstream/10651/17777/6/TFM_Ana_AlvarezProteg.pdf

especial con el contenido de lignina de la muestra a utilizar, es decir gran parte del contenido energético susceptible a ser utilizado de una determinada muestra de biomasa dependerá de la composición estructural de la misma, a mayor porcentaje de lignina mayor poder calorífico.

1.5.7 Poder calorífico de la biomasa. Según BUN-CA⁹⁵ todas las formas de biomasa disponibles tienen un valor calorífico importante susceptible a ser aprovechado para la producción de energía ya sea en forma de calor o electricidad, el cual se expresa como la cantidad de energía por unidad física; por ejemplo, Joule por kilogramo. Esta es la energía liberada cuando por ejemplo la biomasa se quema completamente. “Para madera completamente seca, la cantidad de energía por unidad de peso es más o menos igual para todas las especies, los valores pueden variar ligeramente, según el contenido de ceniza: para ramas pequeñas, tienden a ser más bajos y más variables”⁹⁶.

⁹⁵ BUN-CA. Manuales sobre energía renovable BIOMASA. [En línea]. San José, Costa Rica, 2002. p. 49. [Consultado en 18 de julio del 2018]. Disponible en: [http://www2.congreso.gob.pe/sicr/cendocbib/con4_uibd.nsf/5EA2E564AF6F41D405257CC1005B2354/\\$FILE/Manuales_sobre_energ%C3%ADa_renovableBIOMASA.pdf](http://www2.congreso.gob.pe/sicr/cendocbib/con4_uibd.nsf/5EA2E564AF6F41D405257CC1005B2354/$FILE/Manuales_sobre_energ%C3%ADa_renovableBIOMASA.pdf). ISBN 9968-904-02-3

⁹⁶ *Ibíd.*, p. 49.

2. CARACTERIZACIÓN DE LA BIOMASA

Una vez identificados los tipos de madera predominantes en la región oriental y sur del país y determinados los parámetros de interés a evaluar en maderas con fines térmicos, se procedió a realizar el muestreo y posterior caracterización a nivel laboratorio de 7 muestras de madera diferentes, con el fin último de realizar mediante un desarrollo experimental la pirólisis de maderas tropicales y conocer su comportamiento.

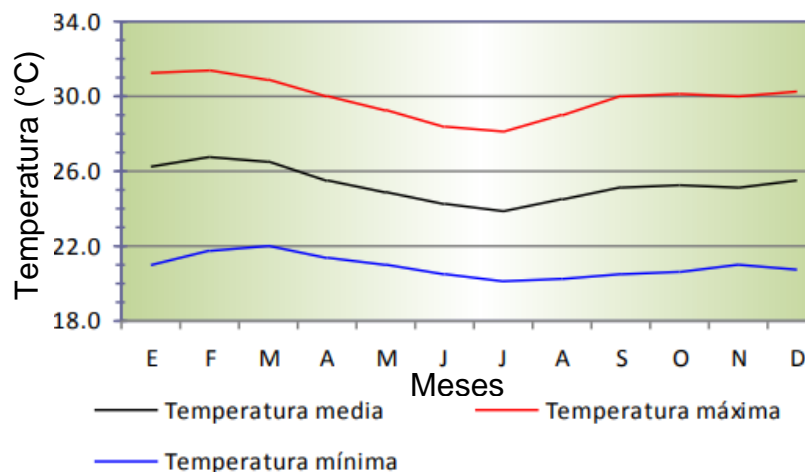
2.1 MUESTREO

Para la caracterización y posterior experimentación del proceso de pirólisis de la fuente de biomasa a utilizar dentro del proyecto (madera), se realizó el muestreo en zona rural de la ciudad de Villavicencio y no directamente en la zona del resguardo Yaigoje en el Vaupés Colombiano en donde finalmente se planea ubicar el sistema de conversión termoquímico de madera con el fin de producir energía, debido a que al ser el presente proyecto de investigación una fase de evaluación y análisis, no se consideró la estricta necesidad de realizar el muestreo *insitu*, en primera instancia por cuestión de costos, ya que el transporte hasta la zona del resguardo indígena es elevado y complejo; en segunda instancia la empresa que encabeza la investigación Aprotéc S.A.S, está ubicada en la ciudad de Villavicencio y dentro de la planeación del proyecto se proyecta su total realización en la ciudad de Villavicencio para posteriormente llevar el equipo funcional de pirólisis a la zona de interés en el Vaupés Colombiano; por otra parte, y con base a la revisión bibliográfica realizada sobre los tipos de madera predominantes en la región oriental del país, se puede observar como un mismo tipo de madera se puede encontrar a través de largas extensiones del territorio nacional y en diferentes zonas del mismo; finalmente y partiendo del hecho de que climatológicamente hablando las condiciones de ambas locaciones son similares se concluyó que las especies o residuos de madera disponibles en zona rural de Villavicencio-Meta serían similares a los que se podrían encontrar en la zona del resguardo Yaigoje, ya que según parques nacionales naturales de Colombia⁹⁷, Yaigojé Apaporis es un territorio con un clima húmedo tropical de temperatura promedio de 27°C y una altura de 100-120 msnm (aprox); por otra parte según el Ideam⁹⁸ la ciudad de Villavicencio es una zona con un clima tropical húmedo de temperatura promedio de 26°C, una altura de 467 msnm (aprox) y una humedad relativa del aire que oscila durante el año entre el 67-83% (ver figuras 6 y 7).

⁹⁷ PARQUES NACIONALES NATURALES DE COLOMBIA. [Sitio web]. Parque Nacional Natural Yaigojé Apaporis. Ministerio de ambiente. [Consultado el 13 de Julio de 2018]. Disponible en: <http://www.parquesnacionales.gov.co/portal/es/parques-nacionales/parque-nacional-naturalyaigoje-apaporis/>

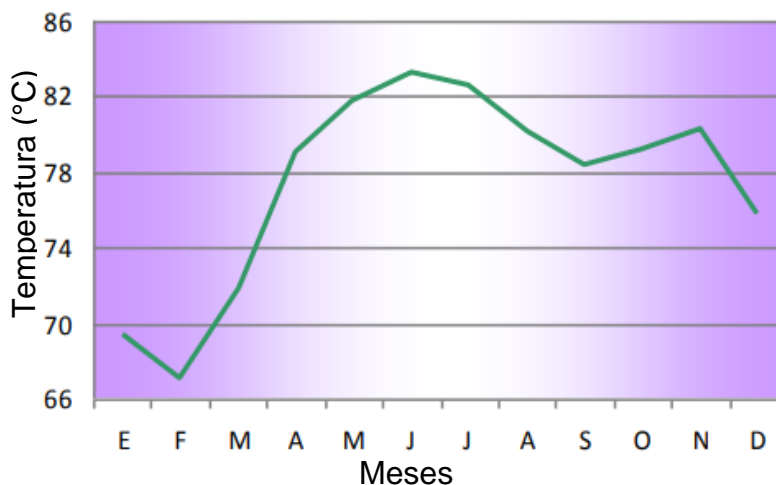
⁹⁸ GARCÍA DEL TORO, Javier R. Características climatológicas de ciudades principales y municipios turísticos. IDEAM. [En línea], 1982. p. 20. [Consultado en 6 de agosto del 2018]. Disponible en: <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21789/1Sitios+turisticos2.pdf/cd4106e9-d608-4c29-91cc-16bee9151ddd>

Figura 6. Temperatura media de Villavicencio.



Fuente: GARCÍA DEL TORO, Javier R. Características climatológicas de ciudades principales y municipios turísticos. IDEAM. [En línea], 1982. p. 20. [Consultado en 6 de agosto del 2018]. Disponible en: <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21789/1Sitios+turisticos2.pdf/cd4106e9-d608-4c29-91cc-16bee9151ddd>

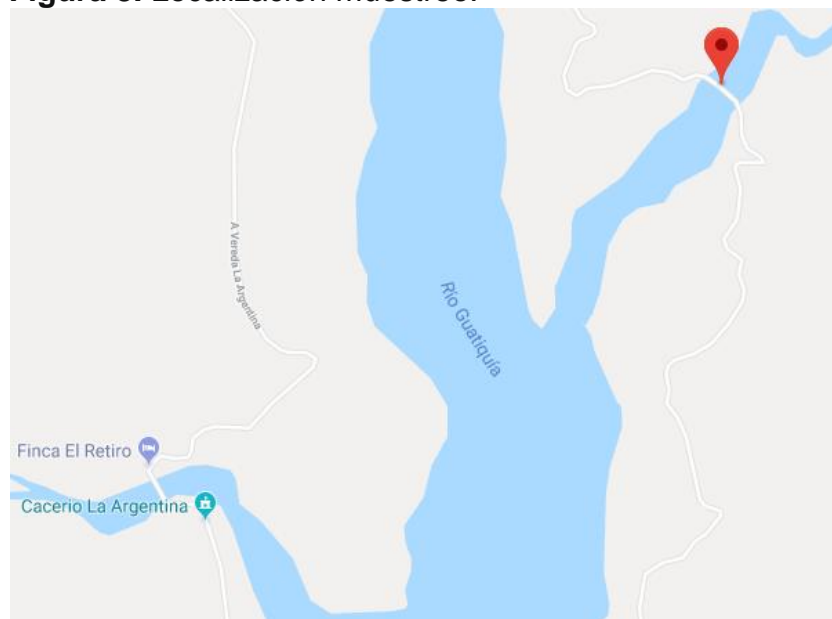
Figura 7. Humedad relativa - Villavicencio.



Fuente: GARCÍA DEL TORO, Javier R. Características climatológicas de ciudades principales y municipios turísticos. IDEAM. [En línea], 1982. p. 20. [Consultado en 6 de agosto del 2018]. Disponible en: <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21789/1Sitios+turisticos2.pdf/cd4106e9-d608-4c29-91cc-16bee9151ddd>

2.1.1 Localización. La recolección de las muestras se realizó en zona rural de la ciudad de Villavicencio Meta (Rio Negro), en cercanías a Puente Abadía ubicado a 4°12'43.9" longitud norte (N) y una 73°37'29.9" latitud occidente (W), (Ver anexo A).

Figura 8. Localización muestreo.



Fuente: Google Maps [Consultado el 12 de junio del 2018].

La recolección de las muestras se realizó con ayuda de personal de Aprotect S.A.S, entidad encargada del proyecto de investigación, quienes con base a su experiencia y su constante interacción con las comunidades indígenas de la zona, permitieron un muestreo que se acercara a los tipos de madera que comúnmente se encuentran en el resguardo; Allí se tomaron 7 muestras de madera diferentes directamente de las orillas del río Negro las cuales fueron dispuestas en bolsas plásticas debidamente identificadas; las 7 muestras de madera húmeda recolectadas fueron trasladadas a la ciudad de Bogotá D.C, para su posterior caracterización y análisis.

2.2 CARACTERIZACIÓN DE LAS MUESTRAS

“La caracterización de la biomasa se encuentra actualmente en proceso de estandarización a escala europea (...). En general se han aplicado para la caracterización normativas de combustibles fósiles equivalentes”⁹⁹. Para la caracterización de la biomasa se realizaron 4 pruebas a nivel laboratorio (laboratorios de la Universidad de América), para determinar parámetros fisicoquímicos de las maderas muestreadas como la densidad, porcentaje de humedad, contenido de cenizas, porcentaje de materia orgánica y el análisis de granulometría. Por otra parte, mediante un barrido bibliográfico se determinaron los valores correspondientes para: análisis elemental (CHONS) y análisis de fracciones (Celulosa, hemicelulosa y lignina) de cada una de las 7 muestras de madera; además de esto se realizó una descripción de las principales características

⁹⁹ NOGUES, Fernando Sebastián; GARCÍA, GALINDO Daniel y REZEAU, Adeline. Energía de la biomasa. Zaragoza, España: Prensas Universitarias de Zaragoza, 2010. p. 47. ISBN 978-84-92774-91-3

organolépticas de cada muestra de madera con el fin de facilitar su identificación y diferenciación.

2.2.1 Características Organolépticas. Con el fin de identificar y diferenciar las 7 muestras de madera obtenidas en el muestreo, se realizó una caracterización organoléptica de las mismas, determinando aspectos como la textura, el color, el olor, el estado de humedad aparente de la madera y el veteado de la misma, obteniendo para cada una de las muestras la siguiente caracterización¹⁰⁰, (Ver anexo A).

Cuadro 1. Características organolépticas de las muestras de madera.

Muestra 1	<i>Textura</i>	Gruesa
	<i>Color</i>	Albura de color café oscuro con transición gradual a duramen de color marrón anaranjado
	<i>Olor</i>	Característico agradable
	<i>Estado de humedad</i>	Alto
	<i>Veteado</i>	Jaspeado
Muestra 2	<i>Textura</i>	Media
	<i>Color</i>	Albura de color marrón negruzco con transición gradual a duramen de color café claro
	<i>Olor</i>	Característico agradable
	<i>Estado de humedad</i>	Alto
	<i>Veteado</i>	Satinado
Muestra 3	<i>Textura</i>	Media
	<i>Color</i>	Albura de color café oscuro con transición gradual a duramen de color marrón grisáceo.
	<i>Olor</i>	Característico agradable
	<i>Estado de humedad</i>	Media
	<i>Veteado</i>	Jaspeado
Muestra 4	<i>Textura</i>	Gruesa
	<i>Color</i>	Albura de color marrón oscuro con transición gradual a duramen de color café amarilloso.
	<i>Olor</i>	Característico agradable
	<i>Estado de humedad</i>	Media
	<i>Veteado</i>	Satinado

¹⁰⁰ ANAYA LÓPEZ, Héctor; VÁSQUEZ CORREA, Ángela María y RAMÍREZ ARANGO, Alejandra María. Curso Anatomía e Identificación de Maderas. [En línea]. Medellín, Colombia, 2011. p. 9-11. [Consultado en 19 de julio de 2018]. Disponible en : <http://191.98.188.189/Fulltext/15149.pdf>

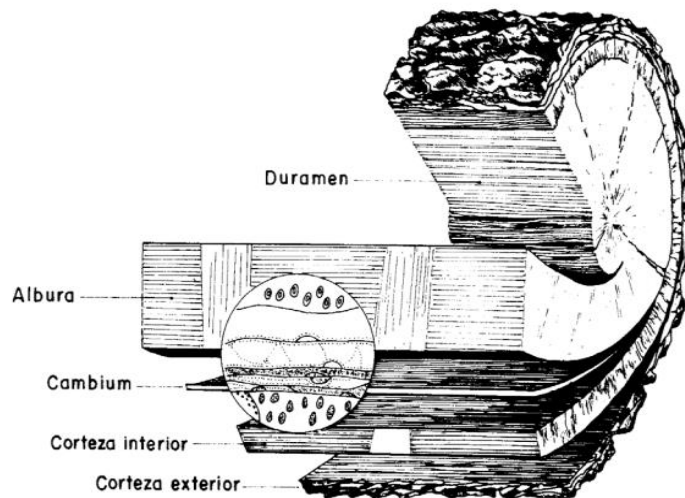
Cuadro 1. (Continuación).

Muestra 5	<i>Textura</i>	Media
	<i>Color</i>	Albura de color café oscuro con transición gradual a duramen de color café amarilloso.
	<i>Olor</i>	Característico agradable
	<i>Estado de humedad</i>	Medio
	<i>Veteado</i>	No acentuado
Muestra 6	<i>Textura</i>	Gruesa
	<i>Color</i>	Albura de color café verdoso con transición gradual a duramen de color café amarilloso.
	<i>Olor</i>	Característico agradable
	<i>Estado de humedad</i>	Medio
	<i>Veteado</i>	No acentuado
Muestra 7	<i>Textura</i>	Media
	<i>Color</i>	Albura de color café grisáceo con transición gradual a duramen de color amarillo pálido.
	<i>Olor</i>	Característico agradable
	<i>Estado de humedad</i>	Bajo
	<i>Veteado</i>	Jaspeado

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 9 se puede observar las partes principales del tronco de madera, en donde se distinguen cinco principalmente: el duramen, la albura, el cambium, la corteza interior y la corteza exterior.

Figura 9. Partes del tronco de la madera.



Fuente: ANAYA LÓPEZ, Héctor; VÁSQUEZ CORREA, Ángela maría y RAMÍREZ ARANGO Alejandra María. Curso Anatomía e Identificación De Maderas. [En línea]. Medellín, Colombia, 2011. p. 5 [Consultado en 19 de julio de 2018]. Disponible en: <http://191.98.188.189/Fulltext/15149.pdf>

2.2.2 Densidad de las muestras. Para la determinación de este parámetro, se hizo uso de la GUÍA OIML G 14 (organización internacional de metrología legal), en donde se tomó un trozo de cada una de las 7 muestras de madera de 11 x 2 cm aproximadamente, se pesaron y se depositaron en una probeta de 100 ml con un volumen conocido de agua (70 ml), registrando el volumen de agua desplazado por el sólido; conociendo entonces este valor y la masa del sólido, se procedió a calcular la densidad de cada una de las 7 muestras de madera (Ver anexo A).

Ecuación 1. Cálculo para densidad

$$Densidad (\rho) = \frac{Masa (g)}{Volumen (ml)}$$

Hacer esta aproximación es válida según la organización internacional de metrología legal ¹⁰¹, siempre y cuando la densidad sea medida a 20 +/- 0.5°C, de lo contrario, una temperatura inferior llevara a un mayor estimado de la densidad del producto, en este caso de la madera, para lo cual es válido aplicar el siguiente factor de corrección:

Ecuación 2. Corrección de densidad.

$$\rho = \rho_t [1 + \gamma(t - 20)]$$

Fuente: ARENAS PARÍS, Carlos Alberto. GUÍA OIML G-14: Medición de densidad. [En línea]. Organización internacional de metrología legal, 2011. 8-9 p. [Consultado en 3 de julio del 2018]. Disponible en: <https://www.oiml.org/en/publications/other-language-translations/spanish/g014-es11.pdf>

En donde:

- ρ = Densidad a 20°C (g/ml).
- ρ_t = Densidad del producto a T °C (g/ml). (Temperatura a la que se midió la densidad del material).
- γ = Coeficiente de expansión de volumen del producto.

El coeficiente de expansión de volumen de la madera es:

$$\gamma_{Madera} = 3.9 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} \text{ }^{102}$$

¹⁰¹ ARENAS PARÍS, Carlos Alberto. GUÍA OIML G-14: Medición de densidad. [En línea]. Organización internacional de metrología legal, 2011. p. 8-9. [Consultado en 3 de julio del 2018]. Disponible en: <https://www.oiml.org/en/publications/other-language-translations/spanish/g014-es11.pdf>

¹⁰² COEFICIENTE DE DILATACIÓN [Anónimo]. [Consultado en 15 agosto del 2018]. Disponible en: http://www.iesdmjac.educa.aragon.es/departamentos/fq/temasweb/FQ4ESO/FQ4ESO%20Tema%206%20Energia/62_dilatacin.html

Tabla 3. Densidad de muestras a 18°C y su corrección.

Muestra	Densidad a 18 °C (g/ml)	Densidad corregida 20°C (g/ml)
1	0,9769	0,9768
2	0,9213	0,9212
3	1,0275	1,0274
4	0,8909	0,8908
5	0,8900	0,8899
6	0,8438	0,8437
7	0,8333	0,8332

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar para este caso el cambio en el valor de la densidad es mínimo debido a que la temperatura a la que se midió solo estaba 2 °C por debajo de la estándar, sin embargo, se puede evidenciar que efectivamente una medición a menor temperatura conlleva a un mayor estimado de la densidad del producto, es decir la relación temperatura densidad es de carácter inverso.

2.2.3 Humedad. Para la determinación de este parámetro, se utilizó un instrumento de medición de humedad, el medidor de humedad y temperatura VA 8040 de Green Tech Instruments (Ver imagen 1), una compañía Mexicana “pionera en la venta de instrumentos de medición ambiental y actualmente incorporando una amplia gama de instrumentos de medición físico-química de las mejores marcas”¹⁰³. Este instrumento “ha sido diseñado para medir la humedad de un material y temperatura del aire. Comúnmente se utiliza para medir el contenido de humedad en la madera de construcción”¹⁰⁴; en el anexo A se pueden encontrar las especificaciones técnicas del medidor de humedad.

El funcionamiento del medidor es a través de 2 sondas las cuales se insertan en el material en este caso madera y mediante la determinación de la conductividad del material, determina el porcentaje de humedad del mismo, este valor se observa en la pantalla digital del instrumento al igual que la temperatura del aire en grados Celsius o Fahrenheit; este parámetro se midió a lo largo de todo el proceso de caracterización de la madera de manera constante, obteniendo un valor para humedad promedio resultado de 4 mediciones (ver anexo A) para cada muestra de madera realizadas en la corteza y el centro de las maderas; el porcentaje de humedad promedio de las maderas muestreadas inicialmente al igual que la masa de cada una de ellas se puede observar en la tabla 4.

¹⁰³ SIERRA, Juan. Green Tech Instruments. [Consultado en 6 agosto del 2018]. Disponible en: <http://greentechmexico.com/medidor-de-humedad-y-temperaturas-en-materiales.html>

¹⁰⁴ GIL, Chon. Medidor De Humedad Y Temperatura VA 8040, Manual Del Usuario. México: CEU Ediciones, 2018. [Consultado en 16 de agosto del 2018]. Disponible en: <http://www.greentechmexico.com/files/Medidor-de-humedad-y-temperatura-VA-8040.pdf>.

Tabla 4. Datos iniciales de humedad y masa de las muestras.

Muestra	Humedad (%)	Masa (g)
1	50,4	716,8
2	59,98	737,3
3	48,8	498,6
4	54,9	802,1
5	55,3	744,9
6	64,5	944,2
7	28,4	1497,4

*Temperatura del aire: 28,1°C
Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar en la tabla 5, se corrobora que el porcentaje de humedad para madera residual gruesa medido con el medidor VA 8040, se aproxima a los rangos de humedad para residuos maderables.

Tabla 5. Contenido de humedad para diferentes tipos de biomasa sólida.

Tipo de biomasa	Contenido de humedad %en peso
Cortezas	25-75
Madera residual gruesa	30-60
Virutas	16-40
Serrín	25-40
Polvo de lijadora	2-8
Pasto empacado	10-15

Fuente: Modificado por el autor con base en NOGUES, Fernando Sebastián y GARCÍA GALINDO, Daniel y REZEAU, Adeline. Energía de la Biomasa. Zaragoza, España: Pressas Universitarias de Zaragoza, 2010. 43 p. ISBN 978-84-92774-91-3

Imagen 1. Medidor de humedad y temperatura VA 8040.



Fuente: Elaboración propia.

2.2.4 Cenizas y material orgánico. Para la determinación de este parámetro, se tomó el peso del material resultante de la calcinación completa, realizada en una mufla a 550+/-2°C durante 2 horas (Ver anexo A) según la norma ASTM E1755 (Standard Test Method for Ash in Biomass); con estos datos se procedió a calcular el porcentaje de cenizas y materia orgánica utilizando las ecuaciones 3 y 4; los resultados para las 7 muestras pueden observarse en la tabla 6.

Ecuación 3. Cálculo del porcentaje de cenizas.

$$\% \text{ Cenizas} = \frac{\text{Peso de ceniza} \times 100}{\text{Peso de muestra}}$$

Ecuación 4. Cálculo del porcentaje de Materia orgánica.

$$\% \text{ Materia orgánica} = 100 - \% \text{ de ceniza}$$

Tabla 6. Porcentaje de cenizas y materia orgánica.

Muestra	%Cenizas	% Materia orgánica
1	11,67	88,33
2	7,43	92,57
3	1,03	98,96
4	3,24	96,76
5	4,29	95,71
6	1,85	98,14
7	1,36	98,64

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar en la tabla 6 el contenido de cenizas de las muestras analizadas, correspondientes a la fracción de la biomasa que no reaccionará al ser pirolizada, varía entre el 1% y el 12%; el porcentaje de ceniza obtenida de la conversión de biomasa según Basu¹⁰⁵, no necesariamente viene en su totalidad de la propia biomasa, esto se debe a que durante la recolección, la biomasa a menudo se raspa con el suelo del bosque y luego se somete a múltiples manejos, durante el cual puede recoger o aglomerar una cantidad considerable de suciedad, roca y otras impurezas, las cuales en la mayoría de casos constituyen el principal componente inorgánico de la biomasa.

Con base a esto se puede concluir que la muestra 1 al ser la que mayor conglomerado de tierra, rocas pequeñas y residuos forestales poseía durante su muestreo (ver anexo A), efectivamente es la que mayor porcentaje de cenizas registró durante el análisis en comparación con las 6 muestras restantes las cuales visualmente no presentaban esas aglomeraciones de residuos forestales ajenos a la biomasa. Por ende, el porcentaje de materia orgánica será menor para la muestra 1 y mayor para las muestras restantes.

¹⁰⁵ BASU Prabir. Biomass Gasification and Pyrolysis. Kidlington, Oxford: Elsevier, 2010. p. 53. ISBN 978-0-12-374988-8

2.2.5 Granulometría. Un análisis de granulometría busca determinar la distribución por tamaños de las partículas de un material sólido; esto con el fin de conocer la distribución de tamaños de las partículas que componen una muestra separada mediante cedazos o tamices¹⁰⁶. De esta manera se logró determinar el diámetro medio de partícula para cada una de las 7 muestras de madera una vez estas fueron sometidas a un proceso de secado y molienda (ver capítulo 3).

La operación de tamizado se realizó para cada una de las 7 muestras de madera durante 15 minutos utilizando una tamizadora marca Pinzuar LTRA (Ver anexo A), con 5 tamices de mallas diferentes (ASTM E-11:8, 14, 25, 30 y 40); en la tabla 7 se pueden observar los datos del tamizado y las especificaciones de las mallas utilizadas.

Tabla 7. Datos de tamizado.

<i>Tamiz</i>	<i>Malla (ASTM E-11)</i>	<i>TYLER (Estándar screen 1910)¹⁰⁷</i>	<i>Abertura (mm)</i>
1	8	8	2.357
2	14	12	1.402
3	25	24	0.701
4	30	28	0.589
5	40	35	0.417
Fondos	-----	-----	-----

Fuente: Elaboración propia.

Una vez realizada la operación de tamizado se determinó el diámetro medio de partícula de cada una de las 7 muestras de madera utilizando la serie Tyler¹⁰⁸ para determinar la abertura efectiva en mm de cada una de las 5 mallas utilizadas y así junto con la fracción másica retenida en cada una de ellas determinar el diámetro medio de cada una de las muestras utilizando la ecuación 5.

Ecuación 5. Cálculo del diámetro medio de partícula (Dm)

$$Dm = \sum x_i * Dp_i$$

Donde:

- Dm= Diámetro medio de partícula (mm).
- X_i= Fracción másica.
- Dp_i= Diámetro de partícula retenido en cada tamiz (mm).

En el anexo A se pueden observar las tablas con la información de cada uno de los 7 procesos de tamizaje que se realizaron para llegar a los resultados contenidos en

¹⁰⁶ GARCÍA, Andreu César, et al. Prácticas de materiales de construcción – I.T. Obras Públicas. [En línea], 2009. p. 2. [Consultado en 23 de julio del 2018]. Disponible en: https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/10998/3/Pr%C3%A1ctica%20N%C2%BA%203%20_Granulometria%20I_.pdf

¹⁰⁷ INTERNACIONAL ISO 565 (TLB2), 1983. Equivalencia Internacional De Tamices.

¹⁰⁸ RAMÍREZ MARÍN, Iván. Operaciones con sólidos, Serie Tyler. p. 20.

la tabla 7 en donde se observan los valores correspondientes al diámetro medio de partícula de cada una de las muestras de madera analizadas:

Tabla 8. Diámetro medio de partícula de las muestras.

Muestra	Diámetro medio, Dm (mm)
1	0,876
2	0,580
3	0,660
4	0,730
5	0,461
6	0,554
7	0,710

Fuente: Elaboración propia.

2.2.6 Análisis elemental. Conocer la composición del material que se utilizara como fuente de biomasa en un proceso de conversión termoquímica como la pirólisis, es de suma importancia ya que la determinación de este parámetro permitirá explicar de forma cuantitativa las diferentes distribuciones de los productos sólidos, líquidos y gaseosos producidos en el proceso.

Teniendo en cuenta que el material a pirolizar es madera, se decidió determinar la composición de la biomasa de manera teórica mediante un barrido bibliográfico, el cual arrojó luego de la revisión de varios autores que la composición elemental (CHONS) de la madera es en resumen muy similar independientemente del tipo de madera, además sabiendo que la investigación busca a futuro la construcción e implementación del proceso de pirólisis de madera como fuente de energía, en donde cualquier tipo de madera ingresara al proceso independientemente de su procedencia, especie o composición elemental, se determinó que este parámetro no era de necesaria determinación a nivel laboratorio y que su conocimiento a nivel teórico sería una hoja de ruta y un punto de referencia a la hora de determinar las especificaciones técnicas del proceso.

Con base a esto se tiene en resumen, que la madera en su “composición media se compone de un 50% de carbono (C), un 42% de oxígeno (O), un 6% de hidrógeno (H) y el 2% de resto de nitrógeno (N) y otros elementos.”¹⁰⁹; La variación en el porcentaje de estos elementos influirá en la distribución final de los 3 productos producidos en el proceso de pirólisis: sólidos, líquidos y gaseosos. En la tabla 9 se pueden observar los valores correspondientes a la composición elemental (CHONS) para diferentes tipos de madera, en donde se puede evidenciar que independientemente del tipo de residuo o fuente forestal, el porcentaje de cada uno de los elementos evaluados es muy similar.

¹⁰⁹ PAZ FONG, Francisco José. Determinación de la composición química de la madera obtenida del primer clareo en árboles de melina (*gmelina arborea roxb.*), de una plantación proveniente del departamento de Izabal. Guatemala: Universidad de san Carlos de Guatemala, 2008. p. 2.

Tabla 9. Composición química de diferentes fuentes de biomasa.

Tipo de biomasa	Porcentaje del peso (sin humedad)						
	C	H	N	O	S	Cl	Ceniza
Madera							
Sauce	47,66	5,2	0,3	44,70	0,03	0,01	1,45
Madera suave	52,10	6,10	0,20	39,90	-	-	1,70
Corteza de madera	50,35	5,83	0,11	39,62	0,07	0,03	3,99
Madera dura	50,48	6,04	0,17	42,43	0,08	0,02	0,78
Eucalipto	50,43	6,01	0,17	41,53	0,08	0,02	1,76
Roble	49,89	5,98	0,21	42,57	0,05	0,01	1,79
Corteza de pino	52,30	5,80	0,29	38,76	0,03	0,01	2,90
Aserrín pino	52,49	6,24	0,15	40,45	0,03	0,04	0,60

Fuente: Modificado por el autor con base en RWEDP, 2002. Citado por BUN-CA. Manuales Sobre Energía renovable BIOMASA. San José, Costa Rica, 2002. p.48.

Por otro lado y con el fin de soportar que la composición elemental de la madera es similar independientemente del tipo de madera, se consultaron distintos autores recopilados en la tabla 10 en donde se pueden observar los valores para la composición elemental de la madera, en donde se evidencia efectivamente la similitud en el porcentaje de carbono, hidrogeno, oxígeno, nitrógeno y azufre presente en las maderas, lo que justifica el por qué no se realizó de manera experimental la determinación de este parámetro.

Tabla 10. Composición elemental de la madera.

Autor	%C	%H	%O	%N	%S
Paz Fong Francisco José ¹¹⁰	50	6	42	0,2	N.R*
Presa Juan Manuel ¹¹¹	50	6	42	0,5	N.R*
Calderón Felipe ¹¹²	48	6	45	0,5	0,1
Romo Ortega Natalia ¹¹³	52,7	5,4	41,1	0,7	0,1
Arroyo-Vinueza Juan Sebastián ¹¹⁴	50	6	43	1	N.R*
Castro Jiménez Diana Catherine ¹¹⁵	42,5	5,51	37,72	0,93	0,064

¹¹⁰ *Ibíd.*, p. 2.

¹¹¹ PRESA, Juan Manuel. Alburá. Artículos de divulgación técnica sobre acabado, cuidado y protección de la madera. [En línea]. Cedria. Abril 2015, vol. 1, p. 4. [Consultado en 7 de agosto del 2018]. Disponible en: <http://blog.cedria.es/wp-content/uploads/2015/04/ALBURA-N1-ESTRUCTURA-COMPOSICION-Y-CLASIFICACION-DE-LA-MADERA.pdf>

¹¹² CALDERÓN, Felipe. Laboratorios Calderón. Bogotá, Colombia. Observación inédita, 2018.

¹¹³ ROMO ORTEGA, Natalia; et al. Evaluación de las propiedades fisicoquímicas y térmicas de tallos de café y su análisis económico para la producción de pellets como biocombustible sólido. [En línea]. En: Revista Eidenar, ejemplar 10, 2011. [Consultado en 6 de agosto del 2018]. Disponible en: <http://revistaeidenar.univalle.edu.co/revista/ejemplares/10/h.htm>

¹¹⁴ ARROYO VINUEZA, Juan Sebastián y REINA GUZMÁN, Washington Salvatore. Aprovechamiento del recurso biomasa a partir de los desechos de madera para una caldera de vapor. [En línea]. En: Ingenius, Revista de ciencia y tecnología, 2016. p. 23. [Consultado en 6 de agosto del 2018]. ISSN 1390-650X. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/316859930_Aprovechamiento_del_recurso_biomasa_a_partir_de_lo_s_desechos_de_madera_para_una_caldera_de_vapor

¹¹⁵ CASTRO JIMÉNEZ, Diana Catherine. Evaluación del proceso de pirólisis aplicado al material Lignocelulósico residual proveniente del pino Patula en atmósfera de dióxido de carbono. [En línea]. Tesis de grado. Bogotá, Colombia: UNIVERSIDAD LIBRE DE COLOMBIA, 2018. p. 67. [Consultado en julio 15 de 2018]. Disponible en:

Tabla 10. (Continuación)

Autor	%C	%H	%O	%N	%S
Promedio	48,86	5,81	41,80	0,63	0,08
σ	3,15	0,25	2,19	0,27	0,01

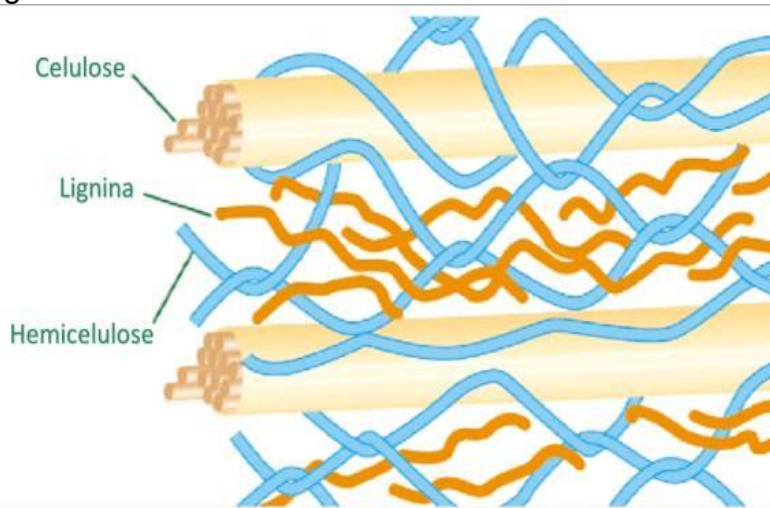
*N.R: No registra

Fuente: Elaboración propia.

2.2.7 Análisis de fracciones. Al igual que la determinación de la composición elemental de la madera como fuente de biomasa, el análisis de fracciones es decir la composición de celulosa, hemicelulosa y lignina contenidas en la madera, también se realizó de manera teórica mediante una revisión bibliográfica con el fin de conocer un rango base para este parámetro que funcione como guía y punto de partida para la construcción de las especificaciones técnicas del proceso pirolítico de maderas tropicales.

La madera hace parte de lo que se conoce como biomasa lignocelulosa; este tipo de biomasa “también llamada biomasa de origen vegetal, generada básicamente por los residuos de los procesos agrícolas, forestales e industriales. Se compone de las tres estructuras básicas de cadenas poliméricas: celulosa, hemicelulosa y lignina”¹¹⁶.

Figura 10. Composición de la pared celular de biomasa lignocelulosa.



Fuente: MEDINA BENINI, Sandra; CASEMIRO DA SILVA, Allan León y SEOLIN DIAZ, Leonice. Fórum Ambiental: Uma Visão Multidisciplinar Da Questão Ambiental: ANAP. 1 ed. 2015. p. 336. ISBN 978-85-68242-18-6

En primera instancia se encuentra la celulosa que es “una estructura de carbohidrato polimérico, denominada polisacárido. Debido a que esta se considera un polímero es insoluble en agua, y básicamente forma la estructura esquelética de

<https://repository.unilibre.edu.co/bitstream/handle/10901/11025/TRABAJO%20DE%20GRADO%20FINAL%20DIANA%20CATHERINE%20CASTRO%20JIM%20C3%89NEZ%20.pdf?sequence=1>

¹¹⁶ *Ibíd.*, p. 19.

la mayor parte de la biomasa terrestre y constituye aproximadamente el 50% del material de la pared celular de una biomasa¹¹⁷.

Por otra parte se tiene a la hemicelulosa, la cual al igual que la celulosa es un “polisacárido complejo, que se encuentra coligado con la celulosa en la pared celular, pero este tipo de polisacárido tiene una estructura ramificada, la cual está compuesta casi en su totalidad por azúcares”¹¹⁸. Finalmente la lignina, que según Aitken¹¹⁹, representa entre 25 y 33 % de la biomasa en madera de especies coníferas y entre 18 y 34 % de frondosas. “Este polímero se encuentra principalmente en la lámina media de la pared celular y en las capas de la pared celular. La lignina es de vital importancia para el organismo vegetal. Desempeña funciones en el transporte de agua, nutrientes y metabolitos en el sistema vascular facilitado por sus propiedades como estructura macromolecular”¹²⁰. En la tabla 11 se observan los rangos en porcentaje que corresponden a la composición estructural general para tallos de madera duras y blandas y otros residuos y desechos.

Tabla 11. Contenido de celulosa, hemicelulosa y lignina de diferentes residuos y desechos.

Material lignocelulósico	Celulosa (%)	Hemicelulosa (%)	Lignina (%)
Tallos de madera dura	40-55	24-40	18-25
Tallos de madera blanda	45-50	25-35	25-35
Cascaras de nueces	25-30	25-30	30-40
Mazorcas de maíz	45	35	15
Pastos	25-40	35-50	10-30
Papel	85-99	0	15
Paja de trigo	30	50	10-30

Fuente: Modificado por el autor con base en LIENQUEO C. María Elena. Caracterización de la Biomasa. [Diapositivas]. Chile, 2010. p. 36.

Luego de revisar información secundaria correspondiente a la composición estructural característica de la madera, al igual que en el caso de la composición elemental se determinó que no era necesaria la evaluación de este parámetro a nivel laboratorio ya que dicha composición no varía de manera significativa de un autor a otro; en la tabla 12 se puede evidenciar el recopilado de las principales fuentes bibliográficas consultadas que dan soporte a la similitud de estos valores.

¹¹⁷ *Ibíd.*, p.18-19.

¹¹⁸ *Ibíd.*, p.19

¹¹⁹ AITKEN. Constituants fibreux des pates papiers et cartons pratique del'analyse, Citado por PRINSEN, Pepijn. Composición química de diversos materiales lignocelulósicos de interés Industrial y análisis estructural de sus ligninas. Tesis de maestría en estudios avanzados en química. Departamento de biotecnología vegetal. Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología de Sevilla. CSIC. Universidad de Sevilla, 2010. 8 p.

¹²⁰ PRINSEN, Pepijn. Composición química de diversos materiales lignocelulósicos de interés industrial y análisis estructural de sus ligninas. Tesis de maestría en estudios avanzados en química. Departamento de biotecnología vegetal. Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología de Sevilla. CSIC. Universidad de Sevilla, 2010. p. 8.

Tabla 12. Composición estructural de la madera.

Autor	%Celulosa	%Hemicelulosa	%Lignina	%Otros
Presa Juan Manuel ¹²¹	50	20	20	10
Calderón Felipe ¹²²	48	21	26	8
Lima Rojas Lizzete ¹²³	52	20	25	10
Montoya Arbeláez Jorge ¹²⁴	42	22	30	N.R
Anaya Roa José Antonio ¹²⁵	45	20	30	5
Promedio	47,4	20,6	26,2	8,25
σ	3,555	0,8	3,709	3,833

N.R: No registra

Fuente: Elaboración propia.

2.2.8 Poder calorífico. Se define el “poder calorífico de una sustancia o combustible como la cantidad de calor que se genera, por kilogramo o metro cúbico de esa sustancia, al oxidarse de forma completa”¹²⁶; es importante conocer el valor del poder calorífico de la biomasa a trabajar, en este caso de la madera ya que esta será utilizada finalmente como combustible.

Existen dos tipos de poder calorífico, el poder calorífico superior y el poder calorífico inferior, el primero hace referencia a “la cantidad total de calor desprendido en la combustión completa de 1 kg de combustible cuando el vapor de agua originado en la combustión está condensado y se contabiliza, por consiguiente, el calor desprendido en este cambio de fase”¹²⁷; por otra parte el poder calorífico inferior hace referencia a “la cantidad total de calor desprendido en la combustión completa de 1 kg de combustible sin contar la parte correspondiente al calor latente del vapor de agua de la combustión, ya que no se produce cambio de fase, y se expulsa como vapor”¹²⁸.

¹²¹ PRESA, Juan Manuel. Artículos de divulgación técnica sobre acabado, cuidado y protección de la madera. [En línea]. Cedria. Abril 2015, vol. 1, p. 4. [Consultado en 10 de agosto del 2018]. Disponible en: <http://blog.cedria.es/wp-content/uploads/2015/04/ALBURA-N1-ESTRUCTURA-COMPOSICION-Y-CLASIFICACION-DE-LA-MADERA.pdf>

¹²² CALDERÓN, Felipe. Laboratorios Calderón. Bogotá, Colombia. Observación inédita, 2018.

¹²³ LIMA ROJAS, Lizzete. Evaluación de la composición química y propiedades físicas de madera y corteza de cuatro coníferas para la producción de bioenergía. Linares, Nuevo León: Universidad autónoma de nuevo León, 2013. p. 3

¹²⁴ MONTOYA ARBELÁEZ, Jorge Iván. Pirólisis Rápida de Biomasa; Medellín, Colombia: 2014. p. 24. ISBN 978-958-761-774-0

¹²⁵ ANAYA ROA, José Antonio. Química De La Madera. [En línea]. [Diapositivas]. 2016. p. 3. [Consultado en 22 de agosto del 2018]. Disponible en: <https://www.slideshare.net/joseantonioanayaroa/quimica-de-madera-polimeros>

¹²⁶ RODRIGUEZ GALBARRO, Hermenegildo. Tablas con los valores del poder calorífico de materiales y combustibles. [En línea]. [Consultado el 16 de octubre del 2018]. Disponible en: https://ingemecanica.com/tutoriales/poder_calorifico.html

¹²⁷ BOTTA Néstor Adolfo. En: Red Proteger. [Sitio web]. Poder Calorífico. [Consultado el 1 de octubre de 2018]. Disponible en: http://www.redproteger.com.ar/poder_calorifico.htm.

¹²⁸ *Ibíd.*, párr. 6.

La determinación del poder calorífico de la madera se realizó de manera teórica, mediante la revisión de diferentes fuentes bibliográficas ya que este valor como se puede evidenciar en las tablas 13 y 14 no varía de manera significativa de un tipo de madera a otra por lo que se concluye que no es necesario realizar esta caracterización a nivel laboratorio.

Tabla 13. Poder calorífico de la madera.

Autor	PC madera (kWh/kg)
AIE y Resolución de la Secretaría de Estado de Energía ¹²⁹	4,41
Néstor Adolfo Botta ¹³⁰	4
Hermenegildo Rodríguez Galbarro ¹³¹	4,28
Eliseo Antonini Valter Francescato y Luca Zuccoli Bergomi ¹³²	4,27
Promedio	4,24
σ	0,149

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 14 se puede evidenciar el poder calorífico en Mcal/kg de diferentes tipos de madera, comprobándose efectivamente la similitud en el valor de este parámetro para este tipo de fuente biomásica.

¹²⁹ EUROSTAT, AIE y Resolución de la Secretaría de Estado de Energía, 2013. Citado por RODRIGUEZ GALBARRO, Hermenegildo. Tablas con los valores del poder calorífico de materiales y combustibles. Ingemeconica. [Sitio web] [Consultado el 12 de octubre del 2018]. Disponible en: https://ingemeconica.com/tutoriales/poder_calorifico.html

¹³⁰ BOTTA, Néstor Adolfo. En: Red Proteger. [Sitio web]. Poder Calorífico. [Consultado el 2 de octubre de 2018]. Disponible en: http://www.redproteger.com.ar/poder_calorifico.htm.

¹³¹ RODRIGUEZ GALBARRO, Hermenegildo. Tablas con los valores del poder calorífico de materiales y combustibles. Ingemeconica. [Sitio web]. [Consultado el 16 de octubre del 2018]. Disponible en: https://ingemeconica.com/tutoriales/poder_calorifico.html

¹³² VALTER FRANCESCATO, Eliseo Antonini y BERGOMI Luca Zuccoli. Manual De Combustibles De Madera. AVEBIOM Asociación Española de Valorización Energética de la Biomasa. España, 2008. p. 26.

Tabla 14. Poder calorífico de distintos tipos de madera.

Material Madera	Fuentes legales			Orden. tipo	Otras fuentes		Red proteger	Valores de cálculo
	RSCIEI	Ord. Sarag.	NTP 47		RENFE	CETIB		
Madera de abedul		4,0					4,5	4,5
Madera de abeto Douglas							4,7	4,7
Madera de abeto seco		4,0				4,0		4,0
Madera de acre							4,3	4,3
Madera e coníferas		4,0					4,6	4,6
Madera de contrachapada		4,0						4,0
Madera de corteza de abeto							12,3	12,3
Madera de dura exótica		4,0						4,0
Madera de encima		4,0						4,0
Madera de haya		5,0					4,5	4,5–5,0
Madera de paletes			90,0			90,0		90,0
Madera de picea							4,9	4,9
Madera de pira		4,0						4,0
Madera de roble			4,0					4,0
Madera de roble rojo							4,5	4,5
Madera de tablero duro							4,8	4,8
Madera de tronco para quemar			4,0					4,0

*Tablas de valores del poder calorífico de materiales y productos químicos (Mcal/kg)

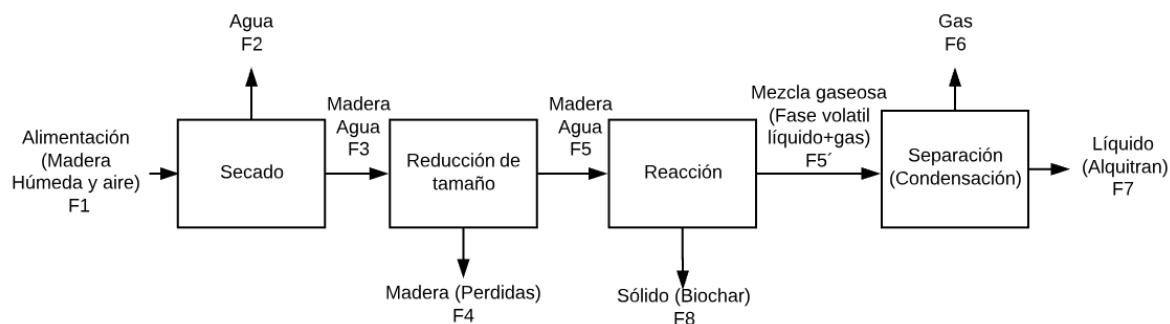
Fuente: Modificado por el autor con base en RODRIGUEZ GALBARRO, Hermenegildo. Tablas con los valores del poder calorífico de materiales y combustibles. Ingemecanica. [Sitio web] [Consultado el 16 de octubre del2018]. Disponible en: https://ingemecanica.com/tutoriales/poder_calorifico.html

3. PROCESO PIROLÍTICO DE MADERAS TROPICALES

Una vez caracterizada la biomasa a utilizar dentro del proceso de pirólisis, en el presente capítulo, se describirá el desarrollo experimental realizado con el fin de conocer el comportamiento del proceso pirolítico de las maderas trabajadas dentro de la investigación. Para esto se determinaron inicialmente las condiciones de operación tanto de la operación de pre tratamiento de la biomasa (secado y disminución del tamaño de partícula) como las condiciones de operación del proceso pirolítico al cual serían sometidas las maderas, el cual se realizaría mediante un desarrollo experimental exploratorio; esto con el fin de determinar el rendimiento de cada uno de los productos salientes del proceso de pirólisis y así contar con precedentes de diseño para lo que sería la propuesta de las condiciones de operación del proceso pirolítico de maderas tropicales que se llevara a cabo en el resguardo Yaigoje Apaporis en la Amazonia Colombiana.

En el diagrama 2 se puede observar el esquema que modela en términos generales el proceso de pirólisis de madera, el cual comprende dos operaciones de pre tratamiento de la biomasa (operación de secado y de reducción de tamaño) y la reacción, así mismo se pueden evidenciar las corrientes resultantes de cada uno de los sub procesos que se llevaran a cabo.

Diagrama 2. Esquema del proceso de pirólisis de madera.



Fuente: Elaboración propia.

3.1 PRE-TRATAMIENTO DE LA BIOMASA

“La utilización energética de los cultivos biomásicos tiene una serie de limitaciones debidas a su heterogeneidad: elevada humedad, tamaño, granulometría muy variable, presencia variable de productos indeseables, etc”¹³³. Ninguna de las propiedades anteriormente descritas favorece la utilización de la biomasa como combustible, por ende, es de suma importancia aplicar tratamientos que estén orientados a la modificación de dichas propiedades físicas. El pretratamiento de la

¹³³ NOGUES, Fernando Sebastián; GARCÍA GALINDO, Daniel y REZEAU, Adeline. Energía de la Biomasa. Zaragoza, España: Pressas Universitarias de Zaragoza, 2010. p. 47. ISBN 978-84-92774-91-3

biomasa es entonces una fase clave del proceso de aprovechamiento energético de este tipo de fuentes combustibles ya que según Nogues, García y Rezeau¹³⁴, estos procesos de adecuación de la biomasa pueden ser clave para la factibilidad y rentabilidad del aprovechamiento energético. Los principales pretratamientos de fuentes biomásicas son: la reducción de humedad, la reducción granulométrica, la densificación y la torrefacción; la realización de todos los pretratamientos anteriormente mencionados no es de obligatoria realización ya que dependerá del tipo de biomasa disponible y del proceso de conversión al cual esta vaya a ser sometida para su aprovechamiento energético.

3.1.1 Operación de Secado. El secado es una operación que busca “la eliminación de la humedad presente en una sustancia o material, aprovechando la vaporización del agua por efecto de la temperatura o la acción de un agente de secado”¹³⁵; Si el material es una fuente de biomasa, que será utilizada como combustible para la producción de energía, es de suma importancia la operación de secado ya que de esta manera aumentara el potencial energético de la biomasa. “Una gran proporción de la madera aserrada en el mundo se seca totalmente al aire, antes de proceder a su elaboración definitiva, o bien parcialmente antes de su posterior secado final en cámara”¹³⁶.

En términos generales un árbol vivo contiene gran cantidad de agua, esto debido a que la utiliza como medio de transporte de las diferentes sustancias nutritivas que necesita para subsistir. Según Álvarez¹³⁷, el peso del agua que contiene la madera en el árbol varía, según las especies, desde la mitad al doble de su peso seco; por esta razón es que los procesos de secado de materiales que pretenden ser utilizados como fuente combustible es de suma importancia para maximizar la eficiencia de los procesos de conversión en este caso de biomasa, ya que según Nogues y Rezeau¹³⁸, a mayores valores de humedad en el biocombustible mayores desventajas se tendrán en el proceso por ejemplo: aumentaran los costos de extracción, manejo y transporte, suponiendo un aumento en peso sin valor energético, además causara inestabilidad en los procesos de conversión termoquímicos disminuyendo su rendimiento, debido a que parte del calor de proceso es absorbido en el proceso de evaporación del agua y finalmente se incrementa la contaminación de los productos combustibles, debido a procesos de conversión incompletos e ineficientes. Entre otras razones se tiene que la operación de secado se realiza con el fin de aumentar el poder calorífico de la muestra, de

¹³⁴ *Ibíd.*, p. 48.

¹³⁵ SILVA LORA, Electo Eduardo y RINCÓN MARTÍNEZ, José María. Bioenergía Fuentes, Conversión y Sustentabilidad. Bogotá, Colombia: Red Iberoamericana de Aprovechamiento de Residuos Orgánicos en Producción de Energía, 2014. p. 100. ISBN 978-958-58880-0-5

¹³⁶ ÁLVAREZ NOVES, Humberto. Secado de la madera al Aire. Madrid, España: Ministerio de agricultura, pesca y alimentación. p. 3. ISBN 84-341-0374-5

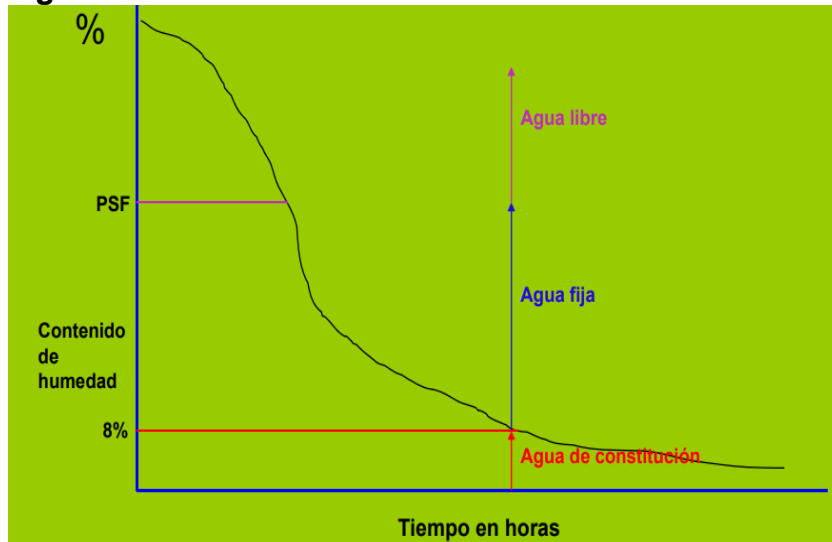
¹³⁷ *Ibíd.*, p. 13.

¹³⁸ NOGUES, Fernando Sebastián y GARCÍA GALINDO, Daniel y REZEAU, Adeline. Energía de la Biomasa. Zaragoza, España: Pressas Universitarias de Zaragoza, 2010. 48 p. ISBN 978-84-92774-91-3

reducir la masa de muestra que debe ser transportada y reducir la conversión biológica que se pueda presentar en la muestra y que pueda degradarla o alterarla.

Existen 3 tipos de agua contenidas en la madera, el agua libre, el agua fija y el agua de constitución; la primera de ellas (agua libre), corresponde según Morris Carreño¹³⁹, a la que se encuentra en las cavidades celulares de la madera y aquella que posee fuerzas capilares muy débiles, es decir el agua de más fácil remoción contenida en la madera; por otra parte el agua fija es la que se encuentra en las “paredes celulares con fuerzas de cohesión mayores”¹⁴⁰, lo que indica que su eliminación requerirá de procesos más elaborados; finalmente el agua de constitución es aquella que “forma parte de la madera, por lo que no se elimina fácilmente”¹⁴¹, esta agua de constitución corresponde a menos del 8% de humedad de la madera por lo que para su eliminación se requerirá la destrucción de la madera (Ver figura 11).

Figura 11. Curva de secado de la madera.



Fuente: MORRIS CARREÑO José Ricardo. Secado De La Madera. [Diapositivas]. [En línea]. Bogotá, Colombia: 2008. p. 15. [Consultado en 9 de octubre del 2018]. Disponible en: <http://asomavalle.org/wp-content/uploads/2011/06/Secado-Cali-Feb-2008.pdf>

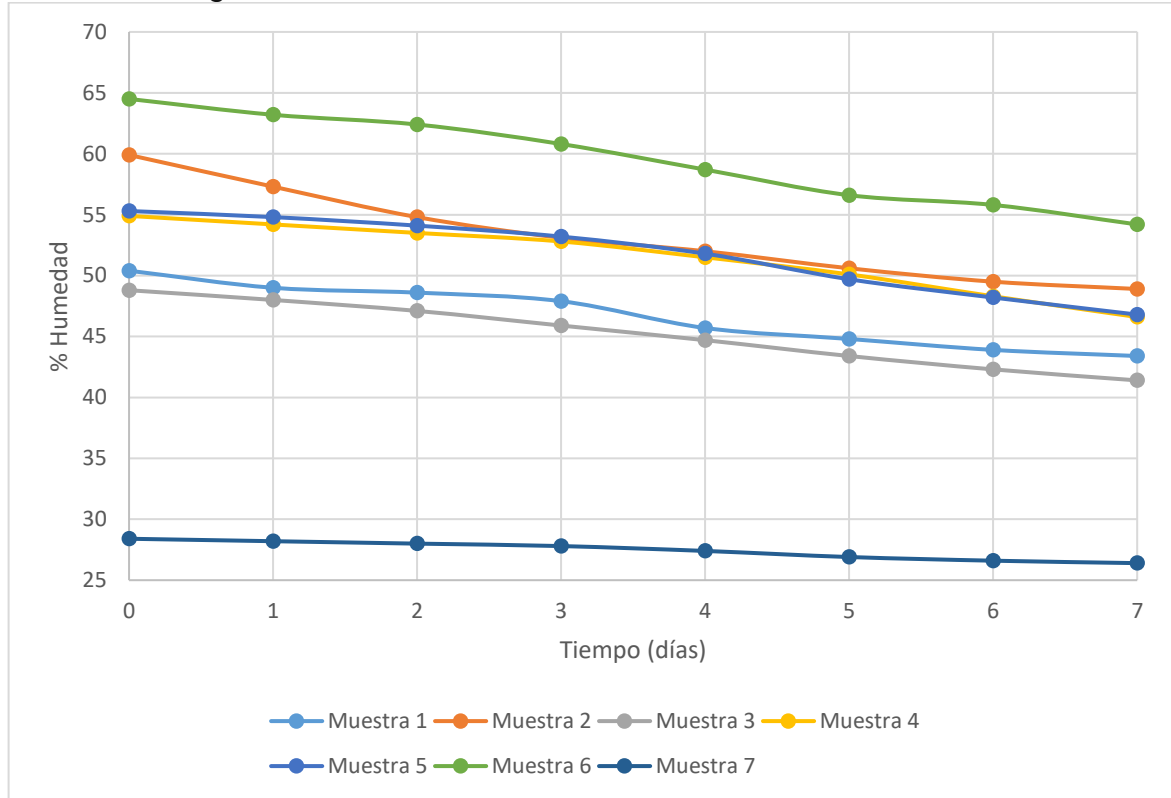
Con base a lo anterior y con el fin de disminuir al mínimo la humedad presente en las 7 muestra de madera, inicialmente se realizó un secado al aire libre (secado directo) durante 7 días en donde se logró una disminución de entre el 7-16% de la humedad inicial de las muestras (Ver gráfico 1).

¹³⁹ MORRIS CARREÑO, José Ricardo. Secado de la madera. [Diapositivas]. [En línea]. Bogotá, Colombia: 2008. p. 12-15. [Consultado en 9 de octubre del 2018]. Disponible en: <http://asomavalle.org/wp-content/uploads/2011/06/Secado-Cali-Feb-2008.pdf>

¹⁴⁰ *Ibíd.*, p. 13.

¹⁴¹ *Ibíd.*, p. 14.

Grafico 1. Progresión de secado al aire libre.



Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar en el grafico 1, mediante el uso de las líneas de tendencia para cada una de las curvas de secado, se determina la pendiente de cada una de ellas con el fin de poder identificar cuál de las muestras tuvo una mayor reducción en el porcentaje de humedad en el tiempo estipulado (7 días), obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 15. Pendiente de curvas de secado de madera al aire libre.

Muestra	Pendiente	Densidad (g/ml)
1	-1,05	0,98
2	-1,54	0,92
3	-1,10	1,03
4	-1,18	0,89
5	-1,27	0,89
6	-1,53	0,84
7	-0,31	0,83

Fuente: Elaboración propia.

Con base a lo anterior y teniendo en cuenta la densidad de cada una de las 7 muestras se puede concluir que en términos generales las maderas de media y baja densidad tienen un secado más rápido que las muestras de alta densidad, sin embargo ese porcentaje de reducción de humedad también se ve influenciado por el porcentaje de humedad inicial de las muestras, ya que independientemente de su densidad entre más seca este la madera menor será su reducción de humedad al aire libre como se puede evidenciar por ejemplo en la muestra 7 quien a pesar de ser una madera de baja densidad, es la muestra de madera con menor porcentaje de humedad inicial por lo tanto su secado al aire libre no tendrá un cambio significativo como si se puede evidenciar en las otras muestras de madera quienes tienen un porcentaje de humedad inicial alto; en esta operación inicial de secado se removió parte del agua libre contenida en la madera.

Posterior a esto se realizó un fraccionamiento manual de cada uno de los 7 troncos muestreados como se puede observar en la imagen 2, con el fin de mejorar la operación de secado que se llevó a cabo en un horno convencional marca Binder E28 (Ver anexo B); este operación se realizó a una temperatura de $110 \pm 2^\circ\text{C}$, temperatura que asegura la completa evaporación del agua contenida en la superficie y fibras capilares de la madera; este proceso se llevó a cabo durante 24 horas, asegurando de esta manera que la humedad de las muestras fuera inferior al 12%, ya que según EMB Construcción¹⁴², la madera considerada seca tiene un porcentaje de humedad que oscila en el grado óptimo entre 12% y 15% (Ver gráfico 2).

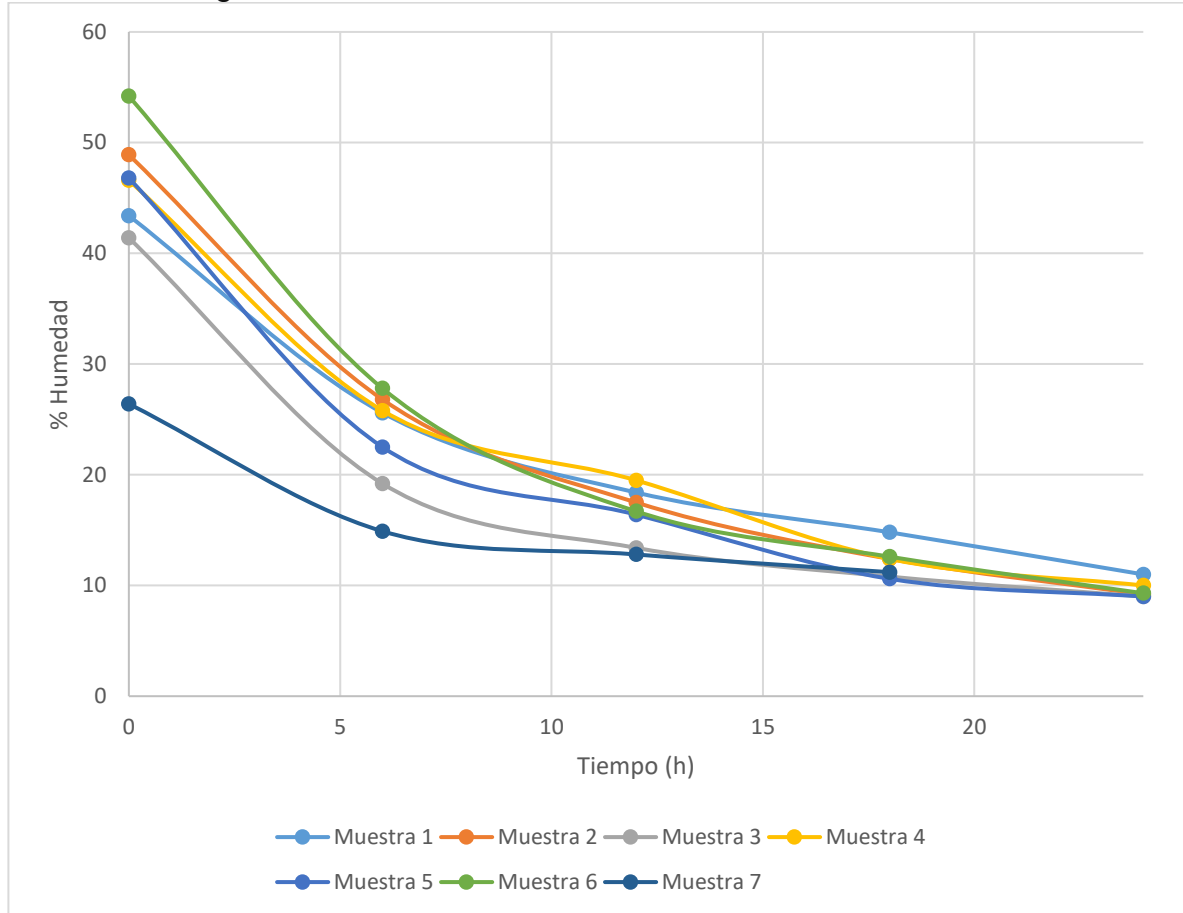
Imagen 2. Fraccionamiento de las muestras.



Fuente: Elaboración propia.

¹⁴² EMB CONSTRUCCIÓN. [Sitio web]. Madera Seca Necesaria en la Construcción. [Consultado en 8 de agosto del 2018]. Disponible en: <http://www.emb.cl/construccion/articulo.mvc?xid=2465&edi=124&xit=madera-seca-necesaria-en-la-construccion>

Grafico 2. Progresión de secado en horno.



Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar en el grafico anterior, la progresión de secado en términos generales tiene 2 etapas, la primera de ellas comprendida desde el tiempo 0 hasta aproximadamente un tiempo de 8 horas en donde el secado presenta una pendiente pronunciada lo que permite concluir que durante este tiempo es donde mayor porcentaje de humedad fue removido de las muestras; este porcentaje de humedad removido hace referencia a la eliminación total del agua libre contenida en la madera y parte del agua fija contenida en la misma; por otra parte luego de las 10 horas de secado se observa que las curvas son más constantes presentando pendientes menos pronunciadas lo que indica que el secado remueve menor porcentaje de humedad (casi la totalidad del agua fija contenida en la madera).

De igual manera, para la progresión de secado en horno, se determinó cuál de las muestras tuvo un mayor porcentaje de reducción en el valor de la humedad, obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 16. Porcentaje de reducción de humedad con secado en horno.

Muestra	% de reducción de humedad	Densidad (g/ml)
1	32,4	0,976
2	39,7	0,921
3	32,4	1,027
4	36,6	0,890
5	37,8	0,889
6	44,9	0,843
7	15,2	0,833

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar en la tabla 16, el porcentaje de reducción de humedad en la operación de secado en horno está estrictamente relacionado con la cantidad de agua inicial con el que la muestra ingresa al proceso, teniendo entonces mayores porcentajes de reducción de humedad en las muestras que ingresaron con humedades iniciales más altas y viceversa.

Con base a los datos que se tenían de las 2 operaciones de secado que se llevaron a cabo (secado al aire libre y secado en horno), no fue posible la contracción de las curvas de velocidad de secado correspondientes a estos dos procesos, debido a que como se puede observar en la ecuación 6 no se cuenta con el valor de la humedad en equilibrio X^* , la cual debe calcularse de manera experimental, ni del área superficial (A) expuesta al secado luego del fraccionamiento de las muestras para mejorar la operación como se puede observar en la imagen 2.

Ecuación 6. Cálculo para la construcción de curva de secado.

$$X_t = \frac{W - W_s \text{ kg totales de agua}}{W_s \text{ kg sólido seco}}$$

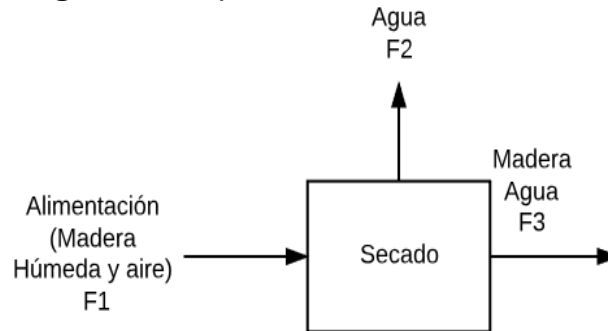
$$X = X_t - X^*$$

$$R = -\frac{L_s}{A} \frac{dX}{dt}$$

Sin embargo, a pesar de no poder construir las curvas de secado que representan los procesos de remoción de agua de las 7 maderas, las gráficas de progresión de secado nos permiten evidenciar las variaciones de humedad respecto al tiempo en donde como se mencionó anteriormente el secado en horno logra el mayor porcentaje de remoción de agua de las muestras hasta llegar a un porcentaje de humedad inferior al 12%.

Finalmente, en el diagrama 3 se puede observar cómo se lleva a cabo la operación de secado, la cual fue una operación de secado directo ya que en el horno se utiliza el aire como fluido que se calienta y retira el agua contenida en las muestras de madera en donde una alimentación que consta de madera húmeda y aire, ingresan al proceso y de este salen dos efluentes correspondientes al agua retirada la cual es arrastrada por el aire durante la operación y la madera seca con un porcentaje de humedad inferior al 12 %.

Diagrama 3. Operación de secado.



Fuente: Elaboración propia.

Con base al diagrama anterior se puede establecer el balance de masa (ver tabla 17) correspondiente a la operación de secado para cada una de las 7 muestras trabajadas, en donde se tiene que:

Ecuación 7. Balance de masa, operación de secado

$$Entra = Sale$$

$$F1 = F2 + F3$$

Tabla 17. Resultados balance de masa, operación de secado

Muestra	Masa inicial F1 (g)	Masa final F3 (g)	Agua retirada F2 (g)
1	716,8	346,2	390
2	737,3	281,2	465,9
3	498,6	183,3	321,1
4	802,1	356,0	462
5	744,9	338,6	420
6	944,2	445,1	514,9
7	1497,4	1091,1	416,2

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar en el balance de masa, efectivamente un porcentaje importante de la masa inicial de las muestras era agua, esto como consecuencia de las condiciones de muestreo de las maderas las cuales como se explicó anteriormente fueron recolectadas de las orillas del río por lo que sus porcentajes

de humedad inicial eran elevados; en la tabla 18 se puede observar el porcentaje de humedad antes y después de la operación de secado.

Tabla 18. Porcentaje de humedad antes y después de operación de secado.

Muestra	%Humedad inicial	%Humedad después de secado
1	50,4	11
2	59,9	9,2
3	48,8	9
4	54,9	10
5	55,3	9
6	64,5	9,3
7	28,4	11,2
	<i>Promedio</i>	<i>9,814</i>
	<i>σ</i>	<i>0,942</i>

Fuente: Elaboración propia.

Con el fin de asegurar que la humedad después del secado se mantuviera por debajo del 12 % hasta que las muestras ingresaran al reactor para ser pirolizadas, estas se depositaron en bolsas zimploc herméticas a las cuales se les retiro la mayor cantidad de aire, evitando el ingreso de aire húmedo presente en el ambiente, además estas se dispusieron en un lugar seco y su humedad fue rectificada antes del ingreso de las muestras al reactor siendo sus valores los mismos reportados luego de la operación de secado.

Por otra parte, con el fin de conocer la potencia eléctrica asociada a la operación de secado en horno, la cual se determina mediante el producto entre el voltaje que es de 110 y la corriente eléctrica medida en amperios; al no conocerse el valor de la corriente no es posible estimar mediante un cálculo matemático la potencia eléctrica asociada al funcionamiento del equipo, sin embargo con ayuda del manual del equipo (Horno marca Binder E28) se determina que la potencia eléctrica asociada a este equipo es de 800 W (0,80 kW) (ver anexo B); con este valor y sabiendo que la operación de secado duro 24 horas, se puede conocer el consumo de energía asociado al proceso el cual es de 19,2 kWh.

3.1.2 Reducción de tamaño de partícula. El objetivo de este pretratamiento es el de reducir la muestra en piezas más pequeñas como: astillas, serrín, polvo, etc., por dos razones principalmente: la primera con el fin de mejorar el proceso de transferencia de calor que se da durante el proceso de conversión termoquímica, en este caso de pirólisis y además facilitar el transporte y manejo de la muestra y en segundo lugar pensando en el reactor que se utilizara en la experimentación, el cual no permite tamaños de partícula de gran tamaño.

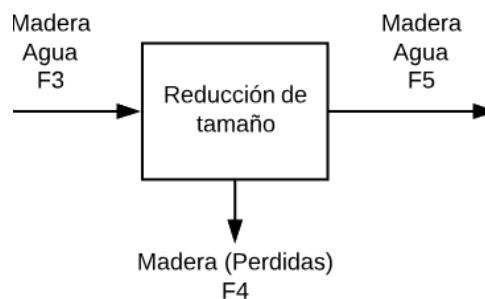
El proceso de molienda se realizó en los laboratorios de la Fundación Universidad de América en un molino de martillos marca SIEMENS (Ver anexo B), durante un

periodo de 15 minutos. Este tipo de molinos son considerados una “tritadora que puede moler, pulverizar, y aplastar una amplia gama de materiales. Esta tritadora emplea una lluvia de golpes de martillo para destruir y desintegrar el material”¹⁴³; Ampliamente usado en la industria alimenticia así como en el procesamiento de semillas oleaginosas. Una de las principales ventajas de este tipo de molinos es su fácil y rápida limpieza, generalmente fabricados de acero inoxidable. En la tabla 16 se puede observar los datos de cada una de las 7 moliendas realizadas a las muestras de madera.

El proceso de molienda se realiza en un molino de martillos y no de bolas, el cual estaba también disponible en los laboratorios de la universidad, básicamente porque este último es un tipo de molino que genera un producto mucho más fino gracias a que “la acción de molienda es frenada por las partículas de mineral más gruesas que se interponen entre barra y barra”¹⁴⁴; además es un método de molienda efectivo cuando el material a moler no es muy grande como por ejemplo semillas, granos, entre otros; Con base a esto se puede concluir que los molinos de bolas permiten llevar a tamaños de partícula muy pequeños (polvos finos), por lo que su implementación para el proceso de molienda de madera para la obtención de madera aserrada y su posterior uso en el proceso de pirólisis no es conveniente.

En el diagrama 4 se puede observar el esquema que modela el proceso de reducción de tamaño de partícula, en donde una alimentación (F3) compuesta de madera con un porcentaje de agua bajo ingresa al proceso y de este salen dos corrientes, una de ellas correspondiente a la madera molida y otra a las pérdidas de material que se generan durante la operación.

Diagrama 4. Proceso de molienda



Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 19 se pueden observar los resultados del balance de masa realizado en el molino con base en el diagrama anterior, en donde se cumple que:

¹⁴³ MAQUINOVA. [Sitio Web]. Ciudad de México, Molino de martillos. [Consulta: 17 de octubre 2018]. Disponible en: <https://www.mezcladorasymolinos.com.mx/productos/molinos/de-martillos/>

¹⁴⁴ QUIMINET. [Sitio Web], Características de los molinos de bolas. [Consultado: 17 de octubre 2018]. Disponible en: <https://www.quiminet.com/articulos/caracteristicas-de-los-molinos-de-bola-56234.htm>

Ecuación 8. Balance de masa en el molino.

$$Entra = Sale$$

$$F3 = F4 + F5$$

Además, se pueden observar algunos datos adicionales de la molienda como la malla utilizada y el tiempo de alimentación.

Tabla 19. Datos de molienda y balance de masa.

Muestra	Malla (mm)	Tiempo de alimentación (s)	Masa a moler F3 (g)	Masa molida F5 (g)	Pérdida de masa F4 (g)
1	2	60	346,2	326,8	19,4
2	2	60	281,2	271,4	9,8
3	2	60	183,3	177,5	5,8
4	2	90	356,0	340,1	15,9
5	2	120	338,6	324,9	13,7
6	2	120	445,1	429,3	15,8
7	2	120	1091,1	1081,2	9,9

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar en la tabla 19 hay un aumento en el tiempo de alimentación al proceso para las muestras 4, 5, 6 y 7, esto se debe a la dureza que tenían estas maderas lo que hizo obligatorio que la alimentación se hiciera más despacio que en las moliendas anteriores con el fin de no afectar el equipo y siguiendo las recomendaciones del personal auxiliar del laboratorio.

Por otra parte, durante el proceso de molienda se determinó mediante el uso de pinzas amperimétricas, el amperaje de cada una de las 7 moliendas realizadas con el fin de visualizar en términos generales el comportamiento del gasto energético que se tuvo durante esta operación de reducción de tamaño de partícula; en la tabla 20 se observa los resultados de la medición para las 7 moliendas realizadas.

Tabla 20. Amperaje en proceso de molienda.

Molienda	Amperaje (A)
Vacío	26,1
1	25,8
2	25,2
3	25,6
4	24,9
5	24,7
6	25,4
7	24,7

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar el amperaje vacío del equipo es mayor al amperaje detectado por las pinzas amperimétricas durante los 7 procesos de molienda, esto se puede explicar haciendo uso de la Ley de Ohm, la cual se expresa mediante la siguiente ecuación:

Ecuación 9. Ley de Ohm

$$I = \frac{V}{R}$$

Donde:

- I = Corriente (Amperios).
- V = Voltaje (Voltios).
- R = Resistencia (Ω).

Con base a esta ley se puede explicar por qué la disminución en el amperaje (corriente) detectado por las pinzas cuando el molino se carga con el material, ya que a mayor resistencia y un voltaje constante, la corriente I será más pequeña, como se puede observar efectivamente en la tabla 20. Por otra parte, con el fin de determinar el consumo eléctrico asociado al uso del molino en términos de potencia eléctrica (W), se tiene que:

Ecuación 10. Cálculo de potencia eléctrica.

$$W = I * V$$

Donde:

- **Corriente (I):** es la corriente eléctrica que requiere un dispositivo para operar.
- **Voltaje (V):** es la tensión eléctrica que suministran las centrales eléctricas.
- **Potencia eléctrica (W):** es la unidad de potencia eléctrica.

A partir de esto y sabiendo que el voltaje es de 110, el cual será constante para los 7 procesos y conociendo el amperaje de las 7 moliendas se tiene un consumo eléctrico asociado para cada proceso, este se muestra en la tabla 21.

Tabla 21. Consumo eléctrico, proceso de molienda.

Molienda	Voltaje (V)	Amperaje (A)	Potencia eléctrica (W)	Potencia eléctrica (kW)	Consumo energético (kWh)
1	110	25,8	2838	2,838	0,7095
2	110	25,2	2772	2,772	0,6930
3	110	25,6	2816	2,816	0,7040
4	110	24,9	2739	2,739	0,6848
5	110	24,7	2717	2,717	0,6793
6	110	25,4	2794	2,794	0,6985
7	110	24,7	2717	2,717	0,6793
			<i>Promedio</i>	2,770	0,6926
			σ	0,048	0,0120

Fuente: Elaboración propia.

3.2 PIRÓLISIS DE MADERA, EXPERIMENTACIÓN

Con el fin de tener un acercamiento a lo que será el comportamiento del proceso pirolítico de maderas que se pretende instalar en el resguardo Yaigojé en el Vaupés Colombiano y bajo la premisa de que al reactor ingresaran diferentes tipos de madera en simultaneo, se decidió realizar inicialmente una mezcla con las 7 muestras de madera anteriormente caracterizadas con el fin de reducir el espacio muestral agrupando las 7 muestras en 3 grupos con base a la similitud en su densidad como se puede observar en la tabla 22, formando 3 nuevas mezclas: A, B y C y de esta manera poder aprovechar los 7 procesos pirolíticos disponibles para la experimentación.

Tabla 22. Agrupación de muestras por densidad.

Muestra	Densidad (g/ml)	Mezcla	Masa (g)
1	0,9768	A	326,8
2	0,9212	B	271,4
3	1,0274	A	177,5
4	0,8908	B	340,1
5	0,8899	B	324,9
6	0,8437	C	429,3
7	0,8332	C	1081,2

Fuente: Elaboración propia.

Para fines del análisis del presente proyecto se tomará la mezcla A (imagen 3), como la mezcla representante de las maderas de alta densidad, a la mezcla B (imagen 4) como representante de las maderas de densidad media y finalmente a la mezcla C (imagen 5), como representante de las maderas de baja densidad.

- **MEZCLA A.** Características en común: Tanto la muestra 1 como la muestra 3 tienen un veteado jaspeado y una albura de color café oscuro con transición gradual a duramen de color marrón.

Imagen 3. Muestras 1 y 3.



Fuente: Elaboración propia.

- Mezcla B. Características en común: Tanto la muestra 2 como la 4 y la 5 presenta una albura de color marrón/café oscuro con transición gradual a duramen de color café amarillado/claro; por otra parte, el veteado de la muestra 2 y 4 es satinado y la de la 5 es no acentuado.

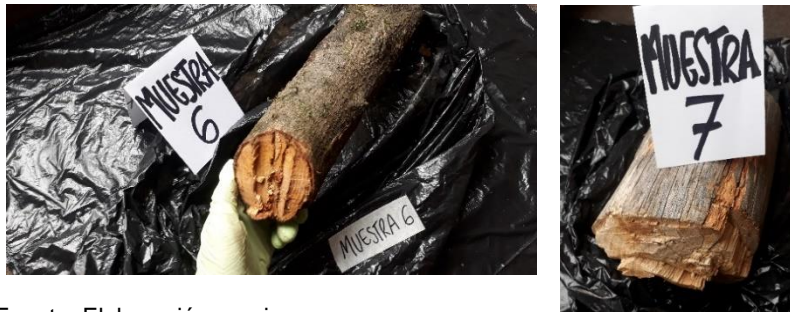
Imagen 4. Muestras 2, 4 y 5.



Fuente: Elaboración propia.

- Mezcla C. Características en común: La muestra 6 y 7 presenta alburas de color café verdoso/grisáceo con transición gradual a duramen de color café amarillado.

Imagen 5. Muestras 6 y 7.



Fuente: Elaboración propia.

La mezcla de las muestras para la formación de las 3 nuevas: A, B y C, se realizó utilizando el 100% del recurso másico disponible que se tenía de cada una de las 7 muestras iniciales con el fin de garantizar que hubiera una cantidad de masa suficiente para realizar todos los procesos pirolíticos y sus réplicas de manera adecuada (ver cuadro 2).

Cuadro 2. Masa total de mezclas A, B y C.

Mezcla	Masa (g)		
	A	Muestra 1	
326,8		177,5	
Total= 504,3			
B	Muestra 2	Muestra 4	Muestra 5
	271,4	340,1	324,9
	Total= 936,4		
C	Muestra 6		Muestra 7
	429,3		1081,2
	Total= 1510,5		

Fuente: Elaboración propia.

Con el fin de determinar las características de la mezcla realizada, se procedió a recalcular la densidad, esta vez de la mezcla teniendo en cuenta que las propiedades físicas de la materia se pueden clasificar como intensivas, si no dependen de la cantidad de materia, o extensivas si dependen de ella. La densidad es entonces una propiedad intensiva ya que relaciona la masa y volumen de un objeto y no dependerá de la cantidad de materia; esta propiedad al ser intensiva no es aditiva, pero es ponderable, es decir, cada sustancia sea sólida, líquida o gaseosa, aportará a la densidad total de la mezcla el porcentaje de volumen o peso individual, respecto al total de todos los componentes presentes como se puede observar en la ecuación 11.

Ecuación 11. Cálculo de la densidad de una mezcla sólida.

$$\rho_{Mezcla} = \rho_A * \%A_{mezcla} + \rho_B * \%B_{mezcla} + \rho_N * \%N_{mezcla}$$

Donde:

- ρ_{Mezcla} = Densidad de la mezcla
- $\%_{mezcla}$ = % que ocupa la especie en la mezcla.

Con base a esto se calculó la densidad para las 3 mezclas realizadas (A, B y C), obteniendo los siguientes resultados (Ver anexo B):

Tabla 23. Densidad de las mezclas A, B y C.

Mezcla	ρ Mezcla (g/ml)
A	0,994
B	0,899
C	0,836

Fuente: Elaboración propia.

Una vez determinada la densidad de las mezclas realizadas, estas se llevaron a Laboratorios Calderón, en donde por medio de un desarrollo experimental exploratorio se realizó el proceso pirolítico de las mezclas anteriormente descritas (A, B y C).

3.2.1 Desarrollo experimental exploratorio. El desarrollo experimental busca establecer la influencia de la composición de la mezcla alimentada al proceso y de la temperatura, sobre el rendimiento del proceso de pirólisis de madera. Se decidió realizar un desarrollo experimental exploratorio y no un diseño de experimentos por dos razones principalmente, la primera de ellas por cuestión de costos ya que realizar un diseño de experimentos completo en donde se tendrían 2 variables independientes, es decir dos factores: temperatura y mezcla alimentada, cada uno con 2 y 3 niveles respectivamente, exigiría 6 tratamientos (diseño 3x2), en donde mínimo se deberían realizar de 2 a 3 réplicas, haciendo que el diseño de experimentos tuviera un total de mínimo 12 a 18 tratamientos o experimentos, lo que tendría un costo elevado debido a los costos asociados a la utilización del reactor pirolítico, lo que impide asegurar el desarrollo de todas las réplicas

necesarias para que la experimentación arroje resultados confiables, además el presente proyecto cuenta únicamente con la financiación para 7 procesos de pirólisis, los cuales como se puede observar son insuficientes para llevar a cabo un diseño experimental riguroso; Finalmente al tener como objetivo el examinar un tema o problema de investigación poco estudiado o que no ha sido abordado antes, según Sampieri¹⁴⁵, los estudios exploratorios son ideales para aumentar el grado de familiaridad con fenómenos relativamente desconocidos o identificar conceptos o variables promisorias, establecer prioridades para investigaciones posteriores o sugerir afirmaciones (postulados) verificables; por ende se concluyó que si no se podía realizar un buen diseño de experimentos la mejor solución es realizar un buen desarrollo experimental exploratorio.

Con base en lo expuesto anteriormente, se inició el desarrollo experimental exploratorio con la realización de una nueva mezcla, denotada como mezcla* con las mezclas anteriormente descritas A, B y C, con el fin de hacer de la experimentación el escenario más cercano a la realidad posible, ya que como se mencionó anteriormente el objetivo del proyecto a largo plazo no es pirolizar muestras de madera de manera individual sino en mezcla aprovechando al máximo el recurso disponible, tratando de acercarse al escenario de cómo llegan las maderas en realidad.

Para poder determinar entonces el porcentaje de cada una de las mezclas A, B y C en el nuevo conjunto de mezclas 1*, 2* y 3* se hizo uso de información secundaria sobre las maderas con mayor presencia en la zona oriente y sur del país realizado en el capítulo 1, con el fin de tener una aproximación a lo que es la distribución de densidades en la zona y en base a esto poder determinar un conjunto de 3 escenarios posibles a tener en la realidad, el primero de ellos (1*), representando al escenario más cercano a la realidad según la bibliografía reportada en donde la disponibilidad de maderas de baja densidad es mayor que las disponibles de media y alta densidad, la segunda mezcla (2*), representando un escenario intermedio en donde el aporte de maderas de baja, media y alta densidad sea igual, y finalmente la tercera mezcla (3*), que representa un escenario ideal en donde hay mayor porcentaje de maderas de alta densidad en la mezcla, escenario que en teoría estaría en pro de mejorar el rendimiento del proceso ya que se sabe que a mayor densidad mejores rendimientos en el proceso de pirólisis se van a obtener.

En la tabla 24 se puede observar el valor de densidad para diferentes tipos de especies de maderas tropicales características de la región oriente y sur del país y sus respectivos nombres comunes y científicos.

¹⁴⁵ HERNÁNDEZ SAMPIERI, Roberto; FERNÁNDEZ COLLADO, Carlos y BAPTISTA LUCIO, María del Pilar. Metodología de la investigación. 5 ed. México, D.F: McGraw-Hill, 2010. p. 85. ISBN 978-607-15-0291-9.

Tabla 24. Densidad de maderas de la región oriente y sur del país.

Especie Nombre común	Especie (Nombre científico)	Densidad (g/ml)
Peinemono	<i>Apeiba membranacea</i>	0,3
Ojé	<i>Ficus insipida Willd</i>	0,32
Gomo	<i>Ficus elástica</i>	0,34
Canalete	<i>Jacaranda copaia Aubl. D. Don</i>	0,35
Aceituno	<i>Simarouba amara</i>	0,36
Achapo	<i>Cedrelinga catenaeformis D. Ducke</i>	0,37
Cumala	<i>Virola Sebifera Aubl.</i>	0,37
Soroga	<i>Vochysia ferruginea</i>	0,37
Yanchama Roja	<i>Poulsenia armata</i>	0,37
Tara	<i>Caesalpinia spinosa Kuntze</i>	0,39
Acapú	<i>Minquartia guianensis Aubl</i>	0,4
Sande	<i>Brosimum krukovii Standley</i>	0,42
Ceiba	<i>Ceiba pentandra (L.) Gaert.</i>	0,43
Arenillo	<i>Dendrobangia boliviana Rusby.</i>	0,47
Andiroba	<i>Carapa guianensis Aubl</i>	0,49
Caracolí	<i>Anacardium rhinocarpus DC.</i>	0,5
Perillo	<i>Couma macrocarpa Barb. Rodr.</i>	0,51
Cedro	<i>Cedrus atlantica (Endl.) G.Manetti</i>	0,53
Cachicamo	<i>Calophyllum brasiliense</i>	0,55
Abarco del amazonas	<i>Cariniana pyriformis Miers</i>	0,59
Castaño Blanco	<i>Aesculus hippocastanum</i>	0,6
Sangre Toro	<i>Rivina humilis L. var. glabra L</i>	0,6
Castaño Rojo	<i>Aesculus x carnea Zeyh.</i>	0,61
Lechero Amarillo	<i>Euphorbia lactiflua</i>	0,63
Sangre Toro	<i>Rivina humilis L. var. glabra L</i>	0,67
Almendro	<i>Prunus dulcis (Mill.) D.A.Webb</i>	0,69
Copaiba	<i>Copaifera officinalis; (Jacq.) L</i>	0,7
Macano	<i>Diphysa americana (Mill.)</i>	0,73
Caimito	<i>Chrysophyllum cainito, L.</i>	0,74
Capirón	<i>Calycophyllum spruceanum, BenthHook.</i>	0,74
Caracolí	<i>Anacardium rhinocarpus DC.</i>	0,75
Algarrobo-Roble	<i>Ceratonia siliqua, L.</i>	0,78
Creolino	<i>Aldina sp.</i>	0,78
Quinilla	<i>Manilkara bidentata (A. DC.) A. Chev</i>	0,87
Acapú	<i>Minquartia guianensis Aubl</i>	0,91
Ahumado	<i>Cedrelinga cateniformis (Ducke)</i>	0,935

Tabla 24. (Continuación)

Especie Nombre común	Especie (Nombre científico)	Densidad (g/ml)
Chonta	<i>Bactris gasipaes Kunth</i>	1,03
Palo Sangre	<i>B. alicastrum Taub.</i>	1,1

Fuente: Modificada por el autor con base en HELVETAS Swiss Intercooperation y Right Resources. Territorio Indígena y Gobernanza. [Sitio web]. [Consultado el 05 de marzo del 2018]. Disponible en: http://www.territorioindigenaygobnanza.com/col_14.html; AGUDELO DELGADO, Mario Andrés. Maderas De Colombia. [En línea]. WWF. Colombia, 2013. p. 7-8. ISBN 978-958-8353-54-8. [Consultado en 05 de marzo del 2018]. Disponible en: http://d2ouvy59p0dg6k.cloudfront.net/downloads/maderas_de_colombia_15_version_aprobada.pdf; LÓPEZ CAMACHO, René, et al. Manual de identificación de especies no maderables del corregimiento de Tarapacá, Colombia. Bogotá, D.C: Sinchi, 2006. ISBN 9589-795072; ATENCIA, María Elena. Densidad De Maderas (kg/M3) Ordenadas Por Nombre Común. [En línea], 2003. [Consultado en 5 de agosto de 2018]. Disponible en: https://www.inti.gob.ar/maderaymuebles/pdf/densidad_comun.pdf

Como se puede observar en la tabla 24, se evidencia en Yaigojé-Apaporis una gran riqueza biológica, ya que esta región “incluye un complejo mosaico de tipos de bosques, en concordancia con la naturaleza transicional de su geografía. El tipo de bosque más extenso se encuentra en las colinas onduladas y bajas de suelos arcillosos rojos y amarillos. La altura promedio del dosel es de 25m con árboles emergentes que alcanzan los 45 m¹⁴⁶; Además es una “zona rica en especies vegetales, en un área de 1Ha, dividida en 10 parcelas, se encontraron 340 árboles, con DAP (diámetro a la altura del pecho) mayor de 15 cm, incluyendo entre 130 - 150 especies diferentes, pertenecientes a 34 familias”¹⁴⁷.

Por otra parte, la revisión bibliográfica de las densidades correspondientes a las especies con mayor presencia en la zona en cuestión permitió tener un acercamiento a lo que es la disponibilidad del recurso en términos de los rangos de densidades lo que facilitó la determinación de la proporción de A, B y C en las 3 nuevas mezclas 1*, 2* y 3* que se realizaron como se puede observar en el cuadro 3.

Cuadro 3. Formación de mezclas a pirolizar.

Mezcla *	Mezcla		
	%A	%B	%C
1*	8,0	12,0	80,0
2*	33,3	33,3	33,3
3*	50,0	20,0	30,0

Fuente: Elaboración propia.

Una vez determinado el porcentaje de A, B y C que conformara cada una de las mezclas 1*, 2* y 3* se procedió a determinar la masa en gramos de A, B y C para formar las nuevas mezclas (ver tabla 25), teniendo en cuenta la cantidad de masa disponible asegurando que esta fuera suficiente para realizar las mezclas y sus

¹⁴⁶ DIAZ MACUNA Et, al. Colparques. [Sitio web]. Yaigojé Apaporis. [Consultado en 20 de diciembre del 2018]. Disponible en: <https://www.colparques.net/yaigoje>

¹⁴⁷ Ibíd., párr 23.

respectivas réplicas así mismo asegurando una cantidad de masa sobrante de A, B y C con el fin de hacer una última experimentación variando la temperatura de operación y así poder determinar su influencia en el proceso, teniendo en cuenta que el proceso pirolítico de las mezclas 1*, 2* y 3* y sus respectivas replicas se realizarían a la misma temperatura de operación (Ver anexo B).

Tabla 25. Masa de mezclas a pirolizar 1*, 2* y 3*.

Mezcla	1*% (Real)	Masa (g)	2*% (Intermedia)	Masa (g)	3*% (Ideal)	Masa (g)
A	8	16,8	33,33	70	50	105
B	12	25,2	33,33	70	30	63
C	80	168	33,33	70	20	42
Suma	100	210	100	210	100	210

Fuente: Elaboración propia.

Una vez realizadas las mezclas se determinó la temperatura de operación a la cual se realizarían los 3 procesos pirolíticos de las mezclas 1*, 2* y 3* y sus respectivas replicas, para ello mediante una revisión bibliográfica se definió la temperatura de operación del proceso teniendo en cuenta que el reactor que se utilizara en Laboratorios Calderón llega a una temperatura máxima de 700°C y opera bajo un proceso de pirólisis convencional (Ver especificaciones del equipo Anexo B).

Según García Cortez¹⁴⁸, la temperatura en el proceso de pirólisis es uno de los parámetros de mayor importancia junto con la velocidad de calentamiento; Los rangos de temperatura de procesos de pirólisis han “variado desde valores bajos (~200°C) hasta bastante elevados (~1100°C), siendo el rango típico de temperaturas de pirólisis de 400°C a 700°C. Al aumentar la temperatura, hasta 500°C, disminuye el rendimiento sólido, lo cual es consistente con un aumento del rendimiento volátil. Sin embargo, a temperaturas más altas (>500°C) ocurre la destrucción de las moléculas más pesadas disminuyendo el rendimiento del producto líquido, mientras que el rendimiento de gas y la conversión total incrementan”¹⁴⁹; por otra parte Beaumont y Schwob¹⁵⁰, afirman que existen 4 etapas dentro del proceso de pirólisis de madera según la evolución de la producción de carbón, aceite pirolítico y gases con respecto a la temperatura, estas 4 etapas son:

- Etapa 1: T<200°C Zona de secado.
- Etapa 2: 220°C<T<330°C, Predomina la producción de residuo sólido.

¹⁴⁸ GARCÍA CORTEZ, Ángela Nuria. Estudio termoquímico y cinético de la pirólisis de residuos sólidos urbanos. Tesis doctoral en Ciencias químicas. España. Universidad de Alicante, 1993. p. 14.

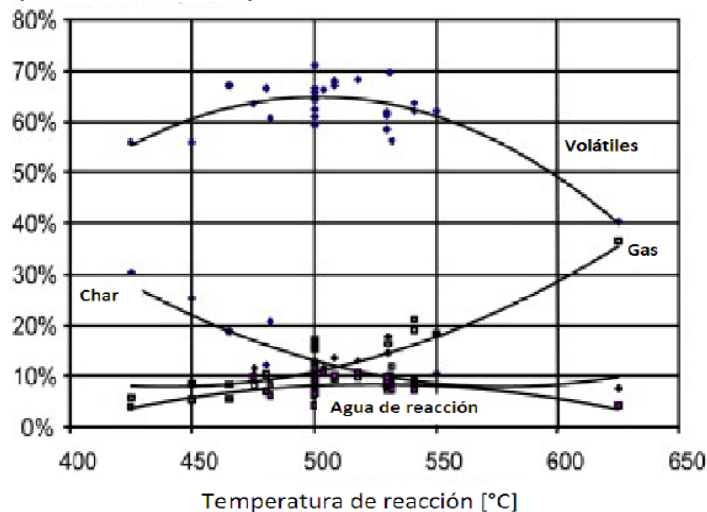
¹⁴⁹ GIRALDO RIVERA, Oscar Darío. Conversión De Biomasa Recalcitrante Originada En La Producción De Etanol a Partir De La Planta De Banano Y Su Fruto En Combustibles Mediante Procesos De Pirólisis. [En línea]. Tesis de maestría en ingeniería química. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas, Escuela de Procesos y Energía, 2012. [Consultado en 30 de agosto del 2018]. Disponible en: <http://bdigital.unal.edu.co/8324/1/15355687.2012.pdf>

¹⁵⁰ BEAUMONT, O. y SCHWOB, Y. Influence of physical and Chemical Parameters on Wood Pyrolysis, 1984. Citado por GARCÍA CORTEZ, Ángela Nuria. Estudio termoquímico y cinético de la pirólisis de residuos sólidos urbanos, Universidad de Alicante, 1993. p. 14

- Etapa 3: $330^{\circ}\text{C} < T < 450^{\circ}\text{C}$, Obtención de verdadero carbón, más del 50% de aceite pirolítico y bajo rendimiento de gas.
- Etapa 4: $T > 500^{\circ}\text{C}$, Aumenta la fracción de gas rápidamente.

Con base a esto se puede concluir que altas temperaturas favorecen el rompimiento de moléculas complejas dando origen a moléculas más sencillas, lo que ocasiona el aumento en la producción de gas al aumentar la temperatura y una disminución en los rendimientos de líquidos y sólidos, como se puede observar en la figura 12, en donde para el gas por ejemplo a temperaturas sobre los 500°C se evidencia un aumento significativo en el rendimiento de este producto, teniendo a temperaturas cercanas a los 650°C rendimientos de cerca del 40%.

Figura 12. Efecto de la temperatura sobre los productos de la pirólisis de madera.

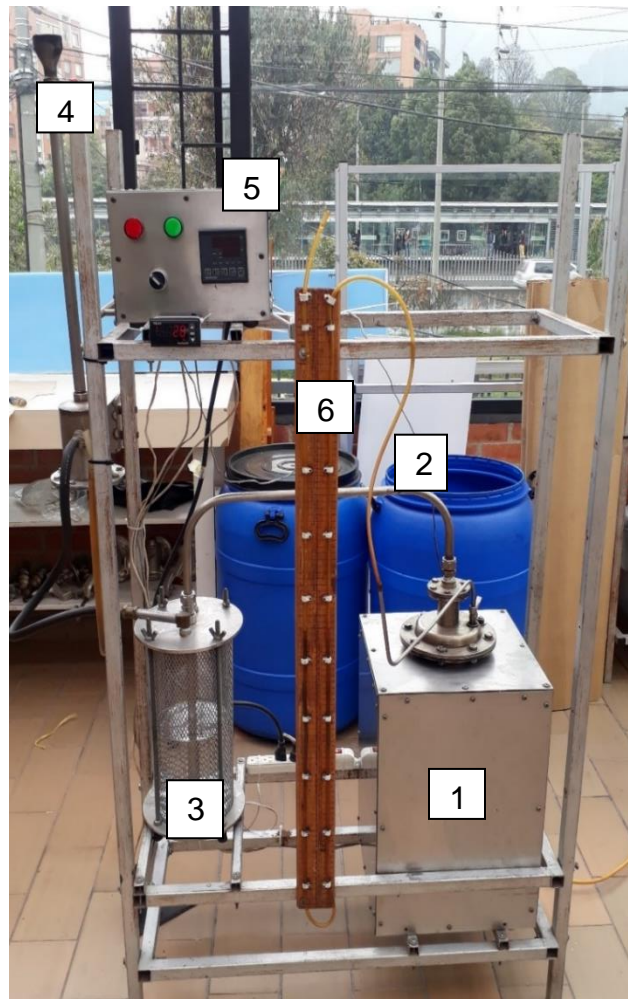


Fuente: A.V. Bridgwater, 2011, Citado por MONTOYA ARBELÁEZ, Jorge Iván, et al. Pirólisis Rápida De Biomasa; Medellín, Colombia; 2014. p. 47. ISBN 978-958-761-774-0

Al aumentar la temperatura de reacción aumenta el rendimiento de los gases disminuyendo el de líquidos y sólidos; por esta razón se determinó que la temperatura de operación a la cual se desarrollaría los 3 procesos pirolíticos variando la mezcla de alimentación al reactor y sus respectivas replicas sería de 650°C .

3.2.2 Experimentación. Una vez determinadas las condiciones de operación y las 3 mezclas para la alimentación del proceso, se procedió a realizar la experimentación. Los equipos para la evaluación del proceso de pirólisis fueron suministrados por la empresa Dr. Calderón Laboratorios Asistencia Técnica Agrícola ubicados en la AK 20 N 87- 81 de Bogotá. Todas las pruebas fueron realizadas a nivel planta piloto; en la imagen 6 se puede observar las instalaciones del equipo de pirólisis utilizado en la experimentación.

Imagen 6. Instalaciones proceso pirolítico en Laboratorios Calderón.





- 1) Reactor SemiBatch 2) Conector de gases 3) Condensador en Húmedo 4) Tea (quemador)
5) Controladores de temperatura 6) Medidor de presión.

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se describe cada uno de los equipos que hacen parte de la instalación del proceso de pirólisis en Laboratorios Calderón.

3.2.2.1 Reactor SemiBatch. El reactor consta de un cilindro vertical construido en acero inoxidable con capacidad volumétrica de 4 L (1,5 kg); el reactor está rodeado por una resistencia eléctrica que va desde el fondo y luego es distribuida a lo largo del reactor (ver imagen 7), activada por un controlador PID; el reactor es introducido en una cobertura de fibra de lana de cerámica que disminuye las pérdidas de calor al exterior.

Tabla 26. Dimensiones del reactor pirolítico.

Reactor	Descripción	Medida (mm)
	Diámetro Externo	207
	Diámetro Interno	150
	Altura	400
Cobertura	Descripción	Medida (mm)
	Alto	450
	Ancho	320

Fuente: Elaboración propia.

Imagen 7. Resistencia del reactor pirolítico



Fuente: Elaboración propia

Imagen 8. Montaje del reactor en cobertura cerámica



Fuente: Elaboración propia

3.2.2.2 Conector de gases. El reactor de pirólisis se conecta al condensador en húmedo mediante un tubo de acero inoxidable ubicado en la parte superior de ambos equipos; este conector permite el desplazamiento de los gases y los productos líquidos.

Tabla 27. Dimensiones del conector de gases.

Tubo conector	Descripción	Dimensiones (mm)
	Largo	560
	Diámetro Interno	40
	Diámetro Externo	49,5

Fuente: Elaboración propia.

3.2.2.3 Condensador en húmedo. El condensador en humeado es un equipo conformado por un cilindro de vidrio de calibre grueso (4mm); el recipiente de vidrio es llenado con 2500 ml de agua a temperatura ambiente aproximadamente a 20°C, siendo el encargado de recibir los gases del reactor de pirólisis permitiendo la condensación en húmedo del aceite pirolítico, extraído posteriormente por decantación.

El condensador húmedo cuenta con una conexión al quemador o tea para los gases no condensables y una malla protectora ubicada alrededor del vidrio para protegerlo (imagen 9).

Imagen 9. Condensador en húmedo.



Fuente: Elaboración propia.

Este condensador en húmedo disminuye la temperatura de los productos salientes del reactor con el fin de lograr su separación mediante el uso de agua, con el fin de separar la fase líquida y la fase gaseosa producto del proceso pirolítico, ya que el

líquido forma una mezcla heterogénea con el agua y esta a su vez con el gas manteniéndolo en la parte superior del condensador en húmedo.

Tabla 28. Dimensiones del condensador en húmedo.

Descripción	Medida (mm)
Alto	350
Diámetro Interno	140
Diámetro Externo	155

Fuente: Elaboración propia.

3.2.2.4 Quemador de gas (tea). En la parte exterior del condensador húmedo de vidrio, se encuentra una conexión hacia un quemador de gases; este equipo recibe los gases no condensables salientes del proceso y los expulsa al exterior del sistema; esta operación se refleja en una llama que se mantiene mientras exista salida de gas combustible.

Tabla 29. Dimensiones de la tea.

Tea	Descripción	Medida (mm)
	Diámetro	59,95
	Largo	224
	Altura del quemador	60,5
	Alto	125
	Diámetro	89,2

Fuente: Elaboración propia.

3.2.2.5 Controladores de temperatura. El equipo cuenta con dos controladores de temperatura que permiten conocer la temperatura del proceso constantemente; estos 2 equipos están conectados al reactor por medio de resistencias eléctricas. El controlador (a) indica la temperatura que registran las resistencias al interior del reactor, mientras que el controlador (b) indica la temperatura que alcanzan los vapores en la salida del reactor.

Imagen 10. Controladores de temperatura.



(a) Controlador de temperatura de las resistencias, TC4Y. (b) Medidor de temperatura de la salida del reactor, X7.

Fuente: Elaboración propia.

3.2.2.6 Medidor de presión.

Imagen 11. Medidor de presión.



Fuente: Elaboración propia.

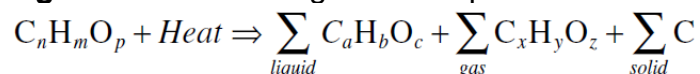
Como se puede observar en la imagen 11, el equipo hace uso de un manómetro de tubo en U para medir la presión en el reactor en cm de agua (cmH₂O).

3.3 RENDIMIENTO PROCESO DE PIRÓLISIS

En términos generales el desarrollo experimental descrito anteriormente puede ser representado mediante un diagrama general de proceso, en donde se pueden observar las 3 operaciones básicas que conforman el proceso de pirólisis, 2 de pretratamiento de la biomasa (operación de secado y reducción de tamaño) y la parte de la reacción en donde se obtienen los 3 productos principales de la pirólisis: el

sólido, el líquido y el gas. A pesar de no conocer con detalle el sistema reaccionante que modele el proceso exacto de pirólisis de madera que se llevó a cabo durante la experimentación, como se puede observar en la figura 13, en términos generales esta reacción parte de una fuente orgánica que mediante la intervención de calor se descompone en 3 productos principales; por otra parte es posible a través los datos obtenidos en la experimentación hacer una estimación de la distribución de los productos de la pirólisis a partir de la alimentación al reactor como se puede observar en la tabla 30.

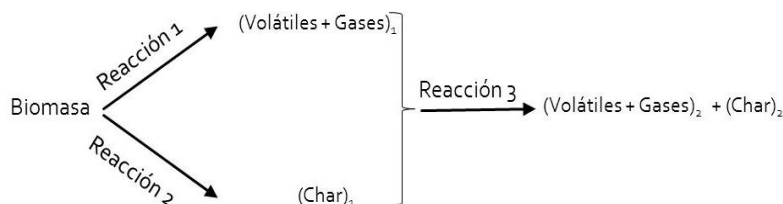
Figura 13. Reacción general de pirólisis.



Fuente: BASU, Prabir. Biomass Gasification and Pyrolysis. Kidlington, Oxford: Elsevier, 2010. p. 23. ISBN 978-0-12-374988-8

Por otra parte en la figura 14 se puede observar de manera general el mecanismo de reacción que se lleva a cabo en el proceso de pirólisis, en donde básicamente según Cubelo¹⁵¹, mediante una descomposición de la biomasa en este caso de la madera por acción del calor se genera una fase volátil compuesta por el producto líquido y gaseoso y la fase sólida en donde se forma el carbón vegetal o biochar; esta primera descomposición de la biomasa se conoce como pirólisis primaria; adicional a esta descomposición ocurre una tercera reacción que se conoce como pirólisis secundaria en donde el biochar comienza a descomponerse, esta pirólisis secundaria dependerá de la temperatura y del tiempo de permanencia del carbón vegetal en el reactor.

Figura 14. Mecanismo de reacción del proceso de pirólisis.



Fuente: CURBELO Alfredo. Gasificación, Seminario internacional de uso energético sostenible de biomasa residual. [Diapositivas]. Bogotá, 2014. 50 diapositivas. [Consultado en 20 de enero del 2019]. Disponible en: <https://slideplayer.es/slide/3346857/release/woothee>

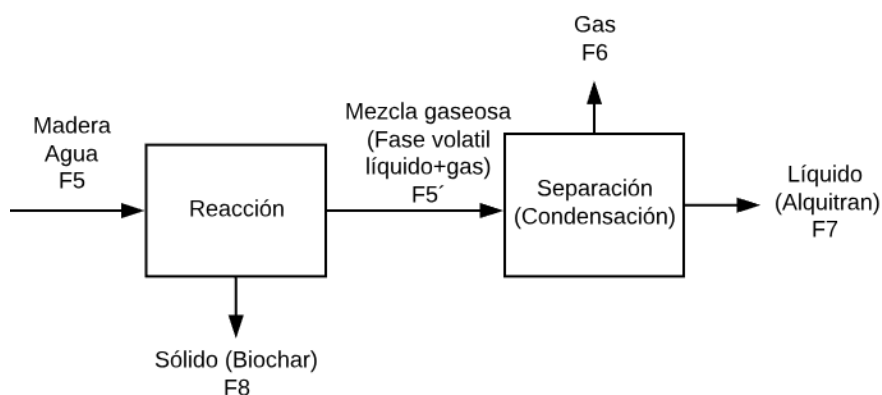
Esta descomposición del biochar repercutirá en un aumento del producto gaseosos debido a la fragmentación de las partículas del sólido en partículas más pequeñas

¹⁵¹ CURBELO Alfredo. Gasificación, Seminario internacional de uso energético sostenible de biomasa residual. [Diapositivas]. Bogotá, 2014. 50 diapositivas. [Consultado en 20 de enero del 2019]. Disponible en: <https://slideplayer.es/slide/3346857/release/woothee>

que logran pasar a la fase volátil aumentando la fracción de gas del proceso, por esta razón es que a mayores temperaturas y tiempos de retención el producto gaseoso se ve favorecido, a diferencia del producto líquido, el cual aumentara con bajos tiempos de retención en donde el biochar no tenga la oportunidad de fragmentarse y pasar a formar parte del producto gaseoso.

En el diagrama 5 se puede observar el esquema que modela la operación de reacción, así como la corriente de alimentación al proceso y las 3 resultantes, correspondientes a los productos generados durante el proceso: sólido, líquido y gas.

Diagrama 5. Diagrama proceso de reacción de pirólisis de madera.



Fuente: Elaboración propia.

Una vez realizados los procesos pirolíticos de los 3 tipos de mezcla 1*, 2* y 3* planteados anteriormente y sus respectivas réplicas (Ver anexo B), se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 30. Resultados proceso pirolítico de maderas tropicales a 650°C.

Mezcla	Productos				
	Alimentación F5 (g)	Sólido F8 (g)	Líquido F7 (g)	Gas F6 (g)	pH (Agua)
1*	210	71	52	87	3
1*R	210	65	64	81	3
2*	210	68	50	92	3
2*R	210	68	51,5	90,5	3
3*	210	67	43,3	99,7	3
3*R	210	68	44,5	97,5	3

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 30 se puede observar una estimación de la distribución de los tres productos obtenidos en el proceso de pirólisis ya que al no poder cuantificar la cantidad de gas saliente del proceso y por ende no poder calcular las pérdidas del mismo, no es posible realizar un balance de masa de esta etapa del proceso; esta

estimación de la distribución de los productos se realizó pesando la cantidad de sólido y líquido saliente del proceso y por diferencia se determinó la cantidad de gas saliente del mismo.

En términos generales el sólido o biochar es una mezcla básicamente de carbón vegetal y las cenizas provenientes de la biomasa, las cuales actúan como inertes dentro del proceso ya que no reaccionan para la formación de productos; por otra parte el producto líquido, se compone básicamente de bioacetos (PM<PM Benceno), alquitranes (PM>PM Benceno) y agua proveniente del agua residual que ingresa junto con la biomasa ya que la humedad de esta a pesar de ser muy baja ($9 < \%H < 11$), no es del 0%; este producto líquido al contener subproductos solubles en agua como ácido acético, alcohol metílico, aldehídos y levoglucosano, este último proveniente de la ruptura de las moléculas de celulosa presentes en la madera a pirolizar y que alcanza a llegar al condensador húmedo solubilizándose en el agua, explican el carácter ácido del producto líquido obtenido en el proceso, el cual se midió para cada muestra mediante papel medidor de pH arrojando un dato de 3 para cada una de las muestras analizadas; finalmente la fase gaseosa, se calculó por diferencia con base a los resultados en peso obtenidos para los productos sólido y líquido.

Con los datos obtenidos en la tabla 30 se procedió a determinar el rendimiento del proceso con base a la fracción másica obtenida de cada uno de los 3 productos salientes con respecto a los 210 gramos de biomasa que ingresaron al reactor; para la determinación del rendimiento se realizó el proceso de normalización de los resultados anteriormente descritos, es decir reportarlos en base libre de cenizas (producto sólido) y libre de agua (producto líquido), con el objetivo de obtener valores de rendimiento que puedan ser aplicados posteriormente en procesos de escalamiento; los resultados del rendimiento pueden observarse a continuación en la tabla 31.

Tabla 31. Rendimiento del proceso (650°C).

Mezcla	R. Sólido %	R. Líquido %	R. Gas %
1*	35,49	16,40	47,73
1* (Replica)	32,20	22,99	44,44
2*	31,36	16,06	51,86
2* (Replica)	31,36	16,90	51,86
3*	29,29	14,31	55,70
3* (Replica)	29,85	14,99	54,47

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar en términos de rendimiento, en primer lugar se puede concluir que la producción de líquido a partir de residuos leñosos es baja, debido en primera instancia a la temperatura ya que la producción de líquido se favorece a temperaturas cercanas a los 500°C ya que por encima de esta es la fracción de gas la que se incrementa debido al rompimiento de moléculas, en segundo lugar el

reactor utilizado (SemiBatch) favorece la aparición de reacciones secundarias (como lo son aromatizaciones o ciclaciones) no deseadas que desplazan el rendimiento del producto líquido hacia el gas y el sólido; por otra parte se puede observar que efectivamente a mayor densidad de la mezcla alimentada al proceso, mayor rendimiento del gas producido, el cual es una mezcla básicamente de agua en forma de vapor ($H_2O_{(v)}$), monóxido de carbono (CO) y dióxido de carbono (CO_2); se sabe que el gas producto del proceso pirolítico que se llevó a cabo es de carácter combustible por dos razones principalmente: la primera de ellas por el fuerte olor a gas natural (metano) que se presencia durante el proceso y en segundo lugar gracias a la llama que se genera al prender la Tea, lo que indica que el gas se quema durante el proceso debido a su carácter combustible; sin embargo en pro de conocer la calidad del gas que está saliendo, se realizó un séptimo proceso replicando la mezcla 3* quien representa como se puede observar en la tabla 31, la mezcla que mejores rendimientos de gas arrojó, con el fin de capturar el gas saliente del proceso y mediante una análisis por cromatografía de gases determinar que compuestos están saliendo en el gas y cuáles de ellos se encuentran en mayor proporción sobre la mezcla total.

3.4 ANÁLISIS DE PRODUCTO GASEOSO (CROMATOGRAFÍA DE GASES)

Con el fin de analizar el gas saliente del proceso de pirólisis de madera, considerando los resultados anteriormente descritos y teniendo en cuenta que el mejor rendimiento de gas se obtuvo a partir de la mezcla 3*, se decidió realizar una última corrida del proceso utilizando dicha mezcla como alimentación al reactor y de esta manera mediante el uso de una bolsa Tedlar capturar el gas de salida para posteriormente por medio de una cromatografía de gases realizada en la Pontificia universidad Javeriana (Dpto. Química), poder caracterizar el gas de salida del proceso.

Esta última experimentación se realizó a una temperatura diferente a la temperatura de $650^{\circ}C$ que se manejó para la realización de los 6 procesos anteriormente descritos, este cambio en la temperatura se realizó con el fin de tener un primer acercamiento a lo que podría ser la influencia de la temperatura en los rendimientos del proceso a la vez que se aprovecha este último proceso como se mencionó anteriormente para capturar el gas saliente y así poderlo analizar; este proceso se realiza entonces a una temperatura de $700^{\circ}C$, el aumento en la temperatura de operación se realiza con base a la teoría que afirma que “a temperaturas elevadas, se favorece la producción de gases, a costa de productos volátiles condensables”¹⁵², como se evidencio anteriormente en la figura 12.

¹⁵² GUEVARA GARCIA, Christopher Gabriel y PABLO ESPINOSA, Manuel Alejandro. Diseño de un reactor de pirólisis experimental para pruebas de biomasa agroforestal. [En línea]. Tesis de grado de ingeniero mecánico. Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción. Guayaquil - Ecuador: Escuela Superior Politécnica del Litoral, 2016. p. 11. [Consultado en 3 de septiembre del 2018] Disponible en: <http://www.dspace.espol.edu.ec/xmlui/bitstream/handle/123456789/36933/D-CD88354.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Una vez realizada la última corrida correspondiente a una alimentación con la mezcla 3* a 700°C, se procedió a determinar el rendimiento del proceso obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 32. Resultados proceso pirolítico mezcla 3* para muestreo de gas.

Mezcla	Productos			
	Biochar (g)	Alquitrán (g)	Gas (g)	pH (Agua)
3*	66	41	103	3

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 33. Rendimiento del proceso (700°C).

Mezcla	R. Sólido %	R. Líquido %	R. Gas %
3*	28,733	13,034	57,546

Fuente: Elaboración propia.

Con base en los resultados presentados en las tablas 32 y 33, y comparándolos con la información de la figura 12, se puede observar que efectivamente al pirolizar maderas cerca a los 700°C el producto mayoritario será el gas, con rendimientos por encima del 45%; por otra parte se puede evidenciar que deberían obtenerse porcentajes de líquido (alquitrán) cercanos al 20%, escenario que no se evidencia en la experimentación ya que se obtienen rendimientos más bajos del líquido (alrededor del 13%), esto puede explicarse ya que al utilizar un reactor SemiBatch, como el usado en la experimentación, el cual como se explicara más adelante al no contar con flujos de gas inerte que desplacen a los productos volátiles, genera reacciones secundarias que disminuyen los rendimientos del proceso en especial el de los líquidos, favoreciendo la producción de compuestos no deseados como aromáticos y cíclicos.

Tabla 34. Distribución de productos de pirólisis de diferentes materias primas.

Mezcla	°C de pirólisis	Gas %	Líquido %	Sólido %
Neumáticos	700	22,4	27,1	39,0
Madera	700	47,1	23	18,6
Fangos depuradora	600	34,3	27,7	33,2

Fuente: Modificado por el autor con base en CASTELLS Xavier, Elías y VELO, Enric. La pirólisis: Tratamiento y valorización energética de residuos. Madrid: Días de Santos, 2012. p. 505. ISBN 978-84-9969-131-2

Por otra parte con base en los resultados obtenidos, se puede evidenciar efectivamente que al aumentar la temperatura en este caso 50°C, el rendimiento del gas se incrementa cerca de 3 puntos porcentuales; sin embargo este aumento en el rendimiento del gas, en términos energéticos puede representar un consumo mayor de energía, en cuanto a la potencia que deben entregar las resistencias al reactor para llevarlo hasta la temperatura deseada, por ello se calcula el consumo energético de manera aproximada mediante el uso de la expresión de calor básica:

Ecuación 12. Cálculo de calor transferido por las resistencias.

$$q = \frac{m * Cp * \Delta T}{t}$$

En donde:

- q= Calor que deberán entregar las resistencias para calentar el reactor (acero inoxidable) para llegar a la temperatura deseada (W).
- Cp.= Calor específico del acero inoxidable (J/kg°C).
- ΔT= Delta de temperatura (°C).
- t= Tiempo en segundos.

Con el fin de hacer del cálculo lo más cercano posible al comportamiento real del proceso, se deciden incluir las pérdidas por radiación, convección y conducción, teniendo entonces el siguiente cálculo:

Ecuación 13. Calor transferido por las resistencias con pérdidas por radiación, convección y conducción.

$$q = \frac{m * Cp * \Delta T}{t} + \epsilon \sigma A_s (T_2^4 - T_1^4) + h A_s \Delta T + \frac{k A_s \Delta T}{\Delta x}$$

En donde:

- q= Calor que deberán entregar las resistencias para calentar el reactor (acero inoxidable) para llegar a la temperatura deseada (W).
- Cp.= Calor específico del acero inoxidable (510 J/kg°C).
- ΔT= Delta de temperatura (°C).
- ε= Emisividad del acero inoxidable (0,25¹⁵³).
- σ = Constante de Stefan-Boltzmann (5,67x10⁻⁸ W/m²°C⁴).
- As= Área superficial (m²)
- h= Coeficiente de convección de aire; “El coeficiente de transferencia de calor h tiene las unidades de W/m²K o Btu/sin²F. El coeficiente h no es una propiedad termodinámica, es una correlación simplificada entre el estado del fluido y las condiciones de flujo, por lo cual generalmente se la conoce como una propiedad de flujo”¹⁵⁴; Según Dassault Systems¹⁵⁵, para aire natural este valor se puede tomar entre 5 y 25 W/m²K con base a esto para fines del presente cálculo se tomara como valor del coeficiente de convección del aire el valor correspondiente al promedio aritmético entre los extremos del rango reportado como valores tipos para este dato, siendo 15 W/m²°C, el valor que se utilizara para el cálculo, ya que para calcular h “hay que determinar teórica o experimentalmente Q para la

¹⁵³ METRING C.A. Emisividad. [En línea]. [Consultado en 2 de noviembre del 2011]. Disponible en: [http://www.metring.com/notes/Hi-10-70-MT2009%20\(1\).pdf](http://www.metring.com/notes/Hi-10-70-MT2009%20(1).pdf)

¹⁵⁴ DASSAULT SYSTEMES. [Sitio web]. Coeficiente de transferencia de calor por convección, 2011. [Consultado en 2 de noviembre del 2018]. Disponible en: http://help.solidworks.com/2011/spanish/SolidWorks/cworks/LegacyHelp/Simulation/AnalysisBackground/ThermalAnalysis/Convection_Topics/Convection_Heat_Coefficient.htm

¹⁵⁵ Ibíd., párr. 10.

geometría y condiciones de contorno impuestas. Para el cálculo teórico se necesita previamente calcular el campo de temperaturas, para el fluido en las proximidades de la pared. Para ello hay que resolver el problema termofluidodinámico conjunto, aplicando el balance másico, mecánico y energético y conociendo las propiedades de estado y de evolución del fluido de que se trate¹⁵⁶, por esta razón es que no se realiza el cálculo exacto del coeficiente de convección para el aire.

- t= Tiempo en segundos.
- K=Conductividad térmica del acero inoxidable (16,3 W/m°C¹⁵⁷)
- Δx=Espesor de la pared del reactor (0,057 m)

Para el cálculo del área superficial del reactor, sabiendo que esta será suma del área superficial de un cilindro y una semiesfera, se tiene la siguiente fórmula para su cálculo:

Ecuación 14. Cálculo del área superficial del reactor.

$$As_{reactor} = 2\pi rL + 2\pi r^2$$

$$As_{reactor} = 2 * \pi * 0,1035m * 0,4m + 2 * \pi * (0,1035m)^2$$

$$As_{reactor} = 0,3274 m^2$$

Mediante el cálculo del calor que deberán entregar las resistencias para calentar el reactor, en este caso fabricado de acero inoxidable para llegar en primera instancia a 650°C y luego a 700 °C, se podrá determinar si este aumento en la temperatura se justifica en términos de dinero, sabiendo que el costo del kWh para zona no residencial es en promedio según CODENSA¹⁵⁸, de \$ 612,12.

Por otra parte se sabe que las resistencias del reactor según el doctor Calderón¹⁵⁹ prendidas aproximadamente entre un 40% y un 60% del tiempo de residencia, como en este caso el tiempo de residencia es de 4 horas, se asume que en realidad las resistencias trabajan alrededor de 2 horas (7200 s), es decir aproximadamente un 50% del tiempo de residencia. Sabiendo entonces que la masa del reactor es de 3,181 kg, que la capacidad calorífica del acero inoxidable es de 510 J/kg°C, que el delta de temperatura para el proceso a 650°C es de 629 y para el proceso a 700°C es de 682, que el área superficial del reactor es de 0,3274 m² y finalmente considerando las pérdidas por radiación, convección y conducción (ver ecuaciones

¹⁵⁶ MARTINEZ I. Convección Térmica Y Másica. [En línea]. En: ATERMODINÁMICA BÁSICA Y APLICADA. p. 272. [Consultado en 12 de enero del 2018]. Disponible en: <http://webserver.dmt.upm.es/~isidoro/bk3/c12/Conveccion%20termica%20y%20masica.pdf>

¹⁵⁷ GOODFELLOW, Todos los materiales para Investigación Científica y Fabricación. [Sitio web]. Acero inoxidable. [Consultado en 2 de noviembre del 2018]. Disponible en: <http://www.goodfellow.com/S/Acero-Inoxidable-AISI-304.html>

¹⁵⁸ CODENSA. Tarifas de energía eléctrica (\$/kWh). Reguladas por la comisión de regulación de energía y gas (CREG). [En línea]. Enero 2019. [Consultado en 15 de enero del 2019]. Disponible en: <https://www.enel.com.co/content/dam/enel-co/espa%C3%B1ol/personas/1-17-1/2019/Tarifario-enero-2019.pdf> tarifas

¹⁵⁹ CALDERÓN Felipe. Laboratorios calderón. Observación inédita, 2018.

15, 16 y 17) se puede calcular el calor entregado por las resistencias para llevar el reactor a 650°C y a 700°C, remplazando los valores anteriormente descritos en la ecuación 13.

Ecuación 15. Cálculo de pérdida de calor por conducción.

$$q = \frac{kA_s \Delta T}{\Delta x}$$

$$q(650^\circ C) = \frac{16,3 \frac{W}{m} \cdot ^\circ C * 0,3254 m^2 * (650^\circ C - 21^\circ C)}{0,057 m} = 58,53 kW$$

$$q(700^\circ C) = \frac{16,3 \frac{W}{m} \cdot ^\circ C * 0,3254 m^2 * (700^\circ C - 21^\circ C)}{0,057 m} = 63,18 kW$$

Ecuación 16. Cálculo de pérdida de calor por convección.

$$q = hA_s \Delta T$$

$$q(650^\circ C) = 15 \frac{W}{m^2} \cdot ^\circ C * 0,3254 m^2 * (650^\circ C - 21^\circ C) = 3,070 kW$$

$$q(700^\circ C) = 15 \frac{W}{m^2} \cdot ^\circ C * 0,3254 m^2 * (700^\circ C - 21^\circ C) = 3,312 kW$$

Ecuación 17. Cálculo de pérdida de calor por radiación.

$$q = \epsilon \sigma A_s (T_2^4 - T_1^4)$$

$$q(650^\circ C) = 0,25 * 5,67 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2} \cdot ^\circ C^4 * 0,3254 m^2 * (650^\circ C^4 - 21^\circ C^4) = 0,8233 kW$$

$$q(700^\circ C) = 0,25 * 5,67 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2} \cdot ^\circ C^4 * 0,3254 m^2 * (700^\circ C^4 - 21^\circ C^4) = 1,1074 kW$$

Ecuación 18. Cálculo calor entregado por las resistencias.

$$q = \frac{m * Cp * \Delta T}{t} + \epsilon \sigma A_s (T_2^4 - T_1^4) + hA_s \Delta T + \frac{kA_s \Delta T}{\Delta x}$$

$$q(650^\circ C) = \frac{3,181 kg * 510 \frac{J}{kg} \cdot ^\circ C * 629^\circ C}{7200 s} + 0,8233 kW + 3,070 kW + 58,53 kW$$

$$q(650^\circ C) = 62,565 kW$$

$$q(700^\circ C) = \frac{3,181 kg * 510 \frac{J}{kg} \cdot ^\circ C * 679^\circ C}{7200 s} + 1,1074 kW + 3,312 kW + 63,18 kW$$

$$q(700^\circ C) = 67,752 kW$$

Con base en los cálculos anteriores, se tiene que la energía requerida es igual a la potencia (kW) x tiempo (h), entonces en términos de dinero sería de 76.588,45\$ para el primer proceso a 650°C y de 82.944,70\$ para el segundo proceso a 700°C,

por lo que se puede concluir que el incremento es de 6.356,70\$ pesos, con base a esto se establece que vale la pena una operación a 700°C, la cual como se evidencio anteriormente mejora los rendimientos del gas y en términos de costo de energía eléctrica no representa un incremento significativo.

Finalmente, para la captura del gas y su posterior análisis, se hizo uso de una bolsa Tedlar de capacidad de 1L conectada mediante una adaptación con un tapón de caucho a la salida del gas (ver imagen 12); Las bolsas Tedlar “son fabricadas con film de polivinil fluoruro (PVF), el cual es resistente, durable, y químicamente inerte a un amplio rango de compuestos. Las bolsas utilizadas en aplicaciones ambientales típicamente tienen un espesor de 2 mm (80 µm) y se utilizan para un amplio rango de temperaturas (98-225 °F). Las bolsas son selladas al calor, libres de filtraciones y pueden ser usadas para coleccionar tanto muestras líquidas como gaseosas”¹⁶⁰.

Imagen 12. Muestreo de gas.



Fuente: Elaboración propia.

Una vez capturado el gas, este se traslada a los laboratorios de química de la universidad Javeriana, en donde se trabajó con un cromatógrafo de gases/masa (GC-MS) acoplado a detector de masas (ver especificaciones del equipo en anexo B).

Imagen 13. Cromatógrafo gases/masa.



Fuente: Elaboración propia.

¹⁶⁰ KEIKA VENTURES. [En línea]. Bolsas Tedlar. [Consultado el 2 de octubre de 2018]. Disponible en: http://www.keikaventures.com/s_tedlar_esp.php

El gas es inyectado al cromatógrafo de gases de forma manual utilizando una jeringa de 5 ml “syringe PTEE tupper leuer lock”, especial para inyectar muestras gaseosas de forma manual al cromatógrafo (ver imagen 14).

Imagen 14. Jeringa para inyección manual del gas al cromatógrafo.



Fuente: Elaboración propia.

Una vez obtenidos los resultados del cromatograma (ver anexo B) del gas producto del proceso, el cual es elaborado comparando los valores arrojados por el equipo con bases de datos del Nist y de W8, se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 35. Resultados cromatografía del gas.

Compuesto	% Dentro de la muestra	Características
Dióxido de carbono	73,64	Gas incoloro; vital para la vida en la Tierra
Cloro metano	0,55	Gas incoloro, se detecta solamente a niveles que pueden ser tóxicos.
Buteno	4,53	Alqueno
Metanotiol	1,02	Compuesto orgánico; gas incoloro con un olor desagradable
Ciclopropano	0,89	Anestésico por inhalación.
Butano	0,12	Gas incoloro; se emplea principalmente como combustible doméstico e industrial.
Furano	4,34	Compuesto orgánico heterocíclico aromático; incoloro, altamente inflamable y muy volátil.
Isopreno	0,53	Altamente inflamable y de fácil ignición
Ciclopentadieno	1,37	Compuesto orgánico
Pentadieno	0,32	Hidrocarburo volátil e inflamable
Ciclopentano	0,64	Hidrocarburo que pertenece a la categoría de los cicloalcanos
1-Buteno	0,11	Alqueno
2-Butenal	0,07	
Hexeno	0,13	Compuesto orgánico
Metilfurano	8,12	Inflamable, insoluble en agua
Penteno	0,08	Alqueno
Ciclohexadieno	0,07	
Benceno	0,42	hidrocarburo aromático
Hepteno	0,04	Compuesto químico del grupo de los compuestos alifáticos insaturados.

Tabla 35. (Continuación)

Compuesto	% Dentro de la muestra	Características
Ciclopentanona	0,04	Cetona cíclica, estructuralmente similar al ciclo pentano.
Dimetilfurano	0,39	Compuesto heterocíclico; Recientes avances han incrementado su atractivo como biocombustible
Fenol	0,11	Compuesto orgánico, incoloro e inflamable.
Ciclobutano	0,05	Compuesto orgánico cíclico; es un gas y comercialmente se presenta como un gas licuado
Cicloheptano	0,07	Ciclo alcano
Etanona	0,17	
Tolueno	0,62	Hidrocarburo de tipo aromático que se produce a partir del benceno
Trimetilpirazol	0,06	
Piridina	0,04	Compuesto aromáticos heterocíclico
Etilbenceno	0,04	Inflamable, incoloro, de olor similar a la gasolina; Se encuentra en productos naturales tales como carbón y petróleo.
Ácido acético	0,03	
Ácido sulfúrico	0,15	Compuesto químico extremadamente corrosivo.
Tributil acetilcitrate	0,43	
Ácido octadecanoico	0,04	
Pentadecano	0,15	Alcano; poco reactivo.
Tricosano	0,62	
TOTAL	100	

Fuente: Elaboración propia con base en cromatograma de gases de pirólisis, elaborado en los laboratorios de la Universidad Javeriana.

Con base a los resultados obtenidos en la cromatografía de gases y comparando esto con lo observado durante la experimentación en donde como se mencionó anteriormente se corrobora que el gas es de tipo combustible al evidenciar que generaba llama al quemarse en la Tea ya que estos gases “están exentos de azufre y nitrógeno fácilmente oxidable lo que hace su combustión poco polucionante, paralelamente, queman con alta eficiencia (alrededor del 98% por ser gases y mezclarse totalmente con el aire) evidenciándose la liberación de hollín y monóxido de carbono”¹⁶¹, además de su olor característico similar al del gas natural, se puede evidenciar mediante los resultados del análisis del gas que efectivamente existe la presencia de varios compuestos aromáticos o cíclicos como el benceno, el ciclohexadieno, la piridina, entre otros, provenientes de reacciones secundarias no deseadas muy comunes cuando se manejan reactores tipo SemiBatch como el utilizado en la experimentación; “Este tipo de reactores se caracteriza por no poseer flujos gaseosos inertes que vayan desplazando los volátiles desprendidos por la reacción, debido a esto ocurren reacciones secundarias (como lo son aromatizaciones o ciclaciones) que afectan el correcto desempeño del equipo en el sentido de que se obtienen productos no deseados”¹⁶²; por otra parte como era de esperarse se puede observar que el componente mayoritario es el dióxido de carbono (CO₂), además de otros hidrocarburos de carácter combustible como el butano y el dimetil furano y algunos hidrocarburos altamente inflamables como el furano, el pentadieno, el isopreno, el etilbenceno, entre otros (ver tabla 35).

Por otra parte, con base a la información registrada en la tabla 36, la cual recopila el porcentaje en peso obtenido en un estudio de cromatografía al que fueron sometidos diferentes gases de pirólisis obtenidos a partir de distintos tipos de residuos de madera, se observa efectivamente la presencia de compuestos como el furano, el ácido acético, el fenol, el propano entre otros, como compuestos en común con los obtenidos en la cromatografía de gases realizada durante la experimentación.

Tabla 36. Rendimiento (% en peso) de algunos de los compuestos detectados por GC-MS, para diferentes productos gaseosos de pirólisis de madera.

Producto	Álamo	Acacia	Pino	Cedro	Ailanthus altissima
Furano	0,05	0,04	0,07	0,03	0,03
trans-isougenol	0,08	0,08	0,00	0,07	0,12
Hidroximetilfurfural	0,03	0,04	0,11	0,05	0,07

¹⁶¹ BLASINA Gonzalo, MORALES Enrique, SLACHI Carlos. Pirólisis de madera y sus posibilidades. [En línea]. [Consultado en 28 de diciembre del 2018]. p. 20. Disponible en: <http://riquim.fq.edu.uy/archive/files/ce00d28ba8ce49541540884fa45057aa.PDF>

¹⁶² OBANDO, Gabriel Andrés. Condiciones de diseño de un Reactor de Pirólisis a escala de laboratorio para la obtención de biocarbón a partir de residuos orgánicos sólidos (ROS). Trabajo de grado Maestría en Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente. Manizales: Universidad de Manizales. Facultad de Ciencias Contables Económicas y Administrativas. Departamento de Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente, 2015. p. 18-19.

Tabla 36. (Continuación)

Producto	Álamo	Acacia	Pino	Cedro	Ailanthus altissima
Propanona	0,083	0,81	1,3	0,95	1,1
Acetaldeido	1,6	1,4	1,6	1,4	1,5
Furfural	0,12	0,23	0,21	0,23	0,25
Etanodiol	0,08	0,07	0,15	0,08	0,11
Fenol	0,06	0,07	0,10	0,07	0,08
Furanmetanol	0,15	0,11	0,11	0,13	0,16
Ácido acético	2,6	3,9	1,4	3,7	3,7
Ácido propiónico	0,18	0,17	0,18	0,17	0,16

Fuente: Modificado por el autor con base en: QING Liu, et al. Pyrolysis of different wood species: Impacts of C/H ratio in feedstock on distribution of pyrolysis products. [En línea] En: ELSEVIER. p. 33. Consultado en 22 de diciembre del 2018]. Disponible en: <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0961953418302873?token=0A4E18E93E30A3A34CF4BBF2B82C8B0B219F2EE1621DFD60E3F969603F3311D773E964F9F4ACFD6763F35DD757D186D4>

Además de esto se sabe que los “productos gaseosos (gases no condensables) incluyen dióxido (45-55% del volumen) y óxido (28-32%) del carbono, hidrógeno (1-2%), metano (8-21%) y otros hidrocarburos (1,5-3,0%)”¹⁶³. Con base a esto y analizando los resultados de la cromatografía de gases se evidencia que el porcentaje correspondiente al dióxido de carbono es del 73% aproximadamente, valor que está por encima del 50% en promedio que debería existir de CO₂ en una muestra típica de gas de pirólisis, este aumento en la presencia de este componente se puede explicar a partir de la forma en la que se llevó a cabo el muestreo, el cual se realizó en su totalidad en el momento en el que se presencié la salida del gas por la tea debido a su olor característico y no durante diferentes momentos en el transcurso del proceso, lo que hubiera hecho de la muestra de gas una muestra mucho más representativa; esto hizo que el oxígeno contenido dentro del reactor posiblemente saliera del proceso en la fase inicial donde se realizó el muestreo aumentando significativamente la cantidad de dióxido de carbono presente en el gas; además según Mendoza¹⁶⁴, un correcto estudio de cromatografía para este tipo de gases de pirólisis, debe realizarse en cromatógrafos especializados en este tipo de muestras y no en cromatógrafos comerciales como el utilizado para realizar el estudio, lo que también puede alterar un poco los resultados obtenidos.

Finalmente encontramos que “la composición de los gases no condensables depende de la temperatura final de la pirólisis, la velocidad y el modo del calentamiento (con la circulación interior o exterior del agente de transmisión de calor, habitualmente de los gases de hornillo recibidos a la quema del combustible

¹⁶³ GREENPOWER. [Sitio web]. Pirólisis de la madera (Destilación de madera). [Consultado en 28 de diciembre del 2018]. Disponible en: <http://carboneros.org/clients/articles/woodpyrolysis/esp/>

¹⁶⁴ MENDOZA Libardo. Fundación universidad de América. Bogotá, Colombia. Observación inédita, 2018.

y de los gases no condensables); el calor de su combustión se varía de 3,05 hasta 15,2 MJ/m³¹⁶⁵.

3.5 BALANCE DE ENERGÍA

Una vez realizados los procesos de pirólisis a 650°C y 700°C, se realiza el balance de energía correspondiente para cada uno, sabiendo que “el principio que rige los balances de energía es la ley de conservación de la energía que establece que la energía no puede crearse ni destruirse”¹⁶⁶, el balance de energía integral para un sistema cerrado puede definirse como:

Ecuación 19. Balance de energía para un sistema cerrado
E. final sistema – E. inicial sistema = E. neta transferida al sistema

Con base en lo anterior se tiene que la “energía total de un sistema corresponde a la sumatoria de tres tipos de energía”¹⁶⁷, la energía cinética que es la “energía debida al movimiento traslacional del sistema considerado como un todo, respecto a una referencia o a la rotación del sistema alrededor de un eje”¹⁶⁸, la energía potencial que es “la energía debida a la posición del sistema en un campo potencial (campo gravitatorio o campo electromagnético)”¹⁶⁹ y finalmente la energía interna que se considera como “toda energía que posee un sistema que no sea cinética ni potencial, tal como la energía debida al movimiento relativo de las moléculas respecto al centro de masa del sistema o energía debida a la vibración de las moléculas o la energía producto de las interacciones electromagnéticas de las moléculas e interacciones entre los átomos y/o partículas subatómicas que constituyen las moléculas”¹⁷⁰; con base en lo anterior los términos de la ecuación 19 se pueden definir como:

- Energía inicial del sistema = $U_i + E_{ci} + E_{Pi}$
- Energía final del sistema = $U_f + E_{cf} + E_{Pf}$
- Energía transferida = $Q + W$

Donde “los subíndices i y f se refieren a los estados inicial o final del sistema, U, Ek, Ep, Q y W representan energía interna, energía cinética, energía potencial, calor transferido al sistema por los alrededores y trabajo realizado por los alrededores sobre el sistema”¹⁷¹; Reagrupando los términos tenemos entonces:

¹⁶⁵ GREENPOWER. Op. Cit., párr. 5

¹⁶⁶ Balances de energía. Procesos industriales. [Anónimo]. [En línea]. [Consultado en 30 de enero del 2019]. p. 3. Disponible en: <http://www3.fi.mdp.edu.ar/procesosindustriales1/archivos/Balance%20de%20energia>

¹⁶⁷ *Ibíd.*, p. 1.

¹⁶⁸ *Ibíd.*, p. 1.

¹⁶⁹ *Ibíd.*, p. 1.

¹⁷⁰ *Ibíd.*, p. 1.

¹⁷¹ *Ibíd.*, p. 4.

Ecuación 20. Primera ley de la termodinámica para sistemas cerrados.

$$(U_f - U_i) + (E_{cf} - E_{ci}) + (E_{pf} - E_{pi}) = Q + W$$
$$\Delta U + \Delta E_c + \Delta E_p = Q + W$$

Con base en lo anterior podemos decir que la energía cinética y potencial son igual a cero (0) debido a que en primera instancia el sistema no se está acelerando o retardando y en segunda instancia no está ascendiendo ni cayendo; por otra parte se considera que el trabajo también es igual a cero bajo la suposición de que no hay “partes móviles, ni corrientes eléctricas, ni radiación en los límites del sistema”¹⁷².

Con base en lo anterior la expresión de la primera ley de la termodinámica para sistemas cerrados se reduce a $\Delta U = Q$, y sabiendo entonces que el calor puede ser calculado utilizando la expresión general de calor se puede establecer el balance de energía para este sistema como se puede observar en la ecuación 21 y 22, las cuales representan el cálculo del balance de masa para los 2 procesos que se llevaron a cabo a 650°C y 700°C, sabiendo que el calor específico de la madera es de alrededor de 1760J/kg°C¹⁷³.

Ecuación 21. Cálculo de la energía interna del sistema de pirólisis a 650°C.

$$\Delta U = Q = m * C_{p_{madera}} * \Delta T$$
$$\Delta U = Q = 0,21 \text{ kg} * 1760 \text{ J}/(\text{kg} * ^\circ\text{C}) * (650^\circ\text{C} - 21^\circ\text{C})$$
$$\Delta U = Q = 232,47 \text{ kJ}$$

Ecuación 22. Cálculo de la energía interna del sistema de pirólisis a 700°C.

$$\Delta U = Q = m * C_{p_{madera}} * \Delta T$$
$$\Delta U = Q = 0,21 \text{ kg} * 1760 \text{ J}/(\text{kg} * ^\circ\text{C}) * (700^\circ\text{C} - 21^\circ\text{C})$$
$$\Delta U = Q = 250,95 \text{ kJ}$$

Como podemos observar, la energía interna asociada a cada uno de los procesos aumenta con el aumento de la temperatura de operación que para este caso fue un incremento de 50°C, este comportamiento explica por qué a mayor temperatura mejoran los rendimientos generales del proceso en especial el del gas que pasa del 54% aproximadamente al 57%.

¹⁷² *Ibíd.*, p. 4.

¹⁷³ CALOR ESPECÍFICO. [Anónimo]. Valvias. [Sitio web]. [Consultado en 30 de enero del 2019]. Disponible en: <http://www.valvias.com/prontuario-propiedades-materiales-calor-especifico.php>

4. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL PROCESO DE PIRÓLISIS DE MADERA

Una vez realizado el proceso pirolítico de maderas tropicales mediante el desarrollo experimental exploratorio descrito en el capítulo anterior y calculado el rendimiento de los productos sólido, líquido y gaseoso de manera normalizada (libre de cenizas y agua) obtenido en la experimentación y finalmente analizado el gas de salida del proceso, en el presente capítulo, se determinarán las especificaciones técnicas del proceso pirolítico de maderas tropicales, pensadas en el proceso que a largo plazo se podría tener realmente en la zona del resguardo Yaigoje en el Vaupés Colombiano para su posterior construcción e implementación.

4.1 CRITERIOS DE DISEÑO

El objetivo a largo plazo del presente proyecto de investigación como se ha venido mencionando es el de implementar un sistema de pirólisis para la producción de energía, aprovechando los 3 productos principales que se obtienen a partir de este proceso.

Sabiendo entonces que la implementación de esta propuesta finalmente será en el resguardo Yaigojé en el Vaupés colombiano en pro del beneficio de las comunidades indígenas Yakuna y Makuna y que la operación de este proceso finalmente se llevara a cabo por los mismos integrantes de la comunidad, es de suma importancia establecer unos criterios de diseño pensados en los beneficiarios finales del proyecto, sus capacidades de pago, operación y mantenimiento, además de tener en cuenta la zona de instalación y funcionamiento del equipo. Con base en lo anterior las especificaciones técnicas del proceso de pirólisis se construirán siguiendo 3 criterios principalmente: el primero es la obtención de suficiente potencia en términos de gases combustibles para generar de 10 a 15 kWh (Valor de potencia eléctrica requerido por la empresa) de energía neta en los bornes de un generador por un periodo continuo de aproximadamente 6 horas diarias (operación por lotes), que tendrá como fin cargar baterías que se utilizaran para impulsar el transporte eléctrico de la zona; el segundo es que el proceso sea capaz de aprovechar de la mejor manera posible los 3 productos principales salientes del proceso de pirólisis, finalmente que el equipo sea sencillo debido la complejidad de la zona en la cual será instalado y en pro de la no invasión de la cultura nativa, por lo tanto se debe pensar en un equipo de fácil transporte, de fácil operación y mantenimiento pensando en el tipo de operarios que el proyecto tendrá en su implementación.

4.1.1 Cantidad de materia prima requerida. La capacidad del proyecto hace referencia a la cantidad de madera que se requiere para poder cumplir con el criterio de diseño de generar de 10 a 15 kWh de energía durante 6 horas diarias a partir del gas combustible producto del proceso de pirólisis. Para poder determinar este parámetro que es la base para establecer las condiciones técnicas del proceso, es

necesario conocer el poder calorífico que se puede obtener a partir del gas de pirólisis y de esta manera conocer cuanta madera (kg) se requeriría para lograr el objetivo anteriormente descrito.

Se sabe que “el gas producido en el proceso de pirólisis se llama “gas pobre” y normalmente su poder calorífico no superará el 25% del poder calorífico del gas natural”¹⁷⁴. Con base a esto y conociendo el valor del poder calorífico para el gas natural que según Botta¹⁷⁵, es de 11,0833 kWh/kg, se espera entonces que el poder calorífico del gas combustible producto del proceso de pirólisis no supere los 2,7708 kWh/kg.

Con el fin de determinar el poder calorífico del gas producto del proceso y sabiendo con base en los resultados arrojados por la cromatografía que el gas es una mezcla de diferentes compuestos, el poder calorífico de esa mezcla se determina mediante la ecuación 23.

Ecuación 23. Cálculo del poder calorífico del gas.

$$PC_{Mezcla} = \sum y_i * PC_i$$

Donde:

- PC_{Mezcla} = Poder calorífico de la mezcla (kWh/kg).
- y_i = Fracción molar o másica.
- PC_i = Poder calorífico del compuesto (kWh/kg).

Con base en los resultados de la cromatografía, se calcula inicialmente la fracción volumétrica de los componentes presentes para poder conocer de esta manera el volumen que aporta cada compuesto a la mezcla, con este dato y conociendo el valor de la densidad de cada especie, se calcula la masa en gramos de cada compuesto para posteriormente determinar la fracción másica de estos (ver anexo C), dato que servirá para conocer el aporte de cada compuesto al poder calorífico total de la mezcla, como se puede observar en la tabla 37. Cabe resaltar que el valor para el poder calorífico de algunos de los componentes presentes en la mezcla no se registran por dos razones principalmente; la primera de ellas como es el caso del dióxido de carbono (CO₂) no tiene poder calorífico al ser producto de la combustión completa, y en segundo lugar ya que en la bibliografía no hay reportes de algunos poderes caloríficos de compuestos presentes en la mezcla, sin embargo al ser la fracción másica de estos compuestos muy pequeña se puede concluir que su aporte en términos del poder calorífico respecto a la mezcla total es insignificante, por lo

¹⁷⁴ SALUD SIN DAÑO–América Latina. Pirólisis, Una técnica de tratamiento térmico no tradicional. [En línea]. Buenos Aires, Argentina. [Consultado en 10 de octubre del 2018]. p. 2. Disponible en web: <<https://saludsindanio.org/sites/default/files/documents-files/1463/Pirolisis.pdf>>

¹⁷⁵ BOTTA, Néstor Adolfo. En: Red Proteger. [Sitio web]. Poder Calorífico. [Consultado el 16 de octubre de 2018]. Disponible en: http://www.redproteger.com.ar/poder_calorifico.htm.

que no son tenidos en cuenta a la hora de cuantificar el poder calorífico de la mezcla de gas.

Tabla 37. Poder calorífico del gas producto del proceso de pirólisis.

Compuesto	Fracción másica	Poder calorífico (kWh/kg)	
		¹⁷⁶ , ¹⁷⁷ , ¹⁷⁸ , ¹⁷⁹	Xi*PC (kWh/kg)
Dióxido de carbono	8,E-01		0,E+00
Cloro metano	7,E-03	2,E+00	1,E-02
Buteno	5,E-02	1,E+01	6,E-01
Metanotiol	6,E-03		0,E+00
Ciclopropano	1,E-02	1,E+01	1,E-01
Butano	2,E-06	1,E+01	2,E-05
Furano	2,E-02	7,E+00	2,E-01
Isopreno	2,E-03		0,E+00
Ciclopentadieno	7,E-03		0,E+00
1-2 Pentadieno	1,E-03	1,E+01	2,E-02
Ciclopentano	3,E-03	1,E+01	4,E-02
1-Buteno	2,E-06	1,E+01	2,E-05
2-Butenal	4,E-04	9,E+00	3,E-03
Hexeno	5,E-04	1,E+01	7,E-03
Metilfurano	5,E-02		0,E+00
1-Penteno	3,E-04	1,E+01	4,E-03
Ciclohexadieno	4,E-04	1,E+01	4,E-03
Benceno	2,E-03	1,E+01	3,E-02
Hepteno	2,E-04	1,E+01	2,E-03
Ciclopentanona	2,E-04		0,E+00
Dimetilfurano	2,E-03		0,E+00
Fenol	7,E-04	9,E+00	7,E-03
Ciclobutano	2,E-04	1,E+01	3,E-03
Cicloheptano	3,E-04	1,E+01	4,E-03

¹⁷⁶ BOTTA, Néstor Adolfo. En: Red Proteger. [Sitio web]. Poder Calorífico. [Consultado el 16 de octubre de 2018]. Disponible en: http://www.redproteger.com.ar/poder_calorifico.htm.

¹⁷⁷ QUINTANA, Rafael. [Sitio web]. Poder Calorífico De Las Sustancias Más Comunes. [Consultado el 16 de octubre del 2018]. Disponible en: <https://cadascu.wordpress.com/2011/05/25/poder-calorifico-de-las-sustancias-mas-comunes/>

¹⁷⁸ INSTITUTO NACIONAL DE SEGURIDAD E HIGIENE EN EL TRABAJO. Poder calorífico de diversas sustancias (Q). [En línea]. Ministerio del trabajo y asuntos sociales. [Citado el 16 de octubre del 2018]. Disponible en:

http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Normativa/TextosLegales/RD/2004/2267_04/Ficheros/tabla1_4.pdf

¹⁷⁹ GARCIA LIMA, Antonio Guilherme. [Sitio web]. Poder Calorífico. [Consultado el 16 de octubre del 2018]. Disponible en: <http://www.antoniolima.web.br.com/arquivos/podercalorifico.htm>

Tabla 37. (Continuación)

Compuesto	Fracción másica	Poder calorífico	
		(kWh/kg) ^{180, 181, 182, 183}	Xi*PC (kWh/kg)
Etanona	0,E+00		0,E+00
Tolueno	3,E-03	1,E+01	4,E-02
Trimetilpirazol	0,E+00		0,E+00
Piridina	2,E-04	9,E+00	2,E-03
Etilbenceno	2,E-04	1,E+01	2,E-03
Ácido acético	2,E-04	5,E+00	9,E-04
Ácido sulfúrico	2,E-03		0,E+00
Tributil acetilcitrate	3,E-03		0,E+00
Ácido octadecanoico	2,E-04		0,E+00
Pentadecano	7,E-04		0,E+00
Tricosano	3,E-03		0,E+00
	1	Pcmezcla	1,1050 kWh/kg 3,98 MJ/kg

Fuente: Modificada por el autor con base en BOTTA, Néstor Adolfo. En: Red Proteger. [Sitio web]. Poder Calorífico. [Consultado el 16 de octubre de 2018]. Disponible en: http://www.redproteger.com.ar/poder_calorifico.htm; QUINTANA, Rafael. [Sitio web]. Poder Calorífico De Las Sustancias Más Comunes. [Consultado el 16 de octubre del 2018]. Disponible en: <https://cadascu.wordpress.com/2011/05/25/poder-calorifico-de-las-sustancias-mas-comunes/>; INSTITUTO NACIONAL DE SEGURIDAD E HIGIENE EN EL TRABAJO. Poder calorífico de diversas sustancias (Q). [En línea]. Ministerio del trabajo y asuntos sociales. [Citado el 16 de octubre del 2018]. Disponible en: http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Normativa/TextosLegales/RD/2004/2267_04/Ficheros/tabla1_4.pdf; GARCIA LIMA, Antonio Guilherme. [Sitio web]. Poder Calorífico. [Consultado el 16 de octubre del 2018]. Disponible en: <http://www.antoniolima.web.br.com/arquivos/podercalorifico.htm>

Como se puede observar en la tabla anterior el poder calorífico de la mezcla correspondiente al gas saliente del proceso de pirólisis es de 1,1050 kWh/kg (3,98 MJ/kg) aproximadamente, dato que está dentro del rango anteriormente expuesto en donde se supone el poder calorífico de este tipo de gases no supera el 25% del poder calorífico del gas natural que es de alrededor de 2,7708 kWh/kg. Finalmente cabe resaltar que a pesar de no realizarse durante la cromatografía la verificación de la presencia de hidrogeno (H₂) en la mezcla, sabiendo que este compuesto suele estar presente en este tipo de gas, el poder calorífico registrado en la tabla 37 según

¹⁸⁰ BOTTA, Néstor Adolfo. En: Red Proteger. [Sitio web]. Poder Calorífico. [Consultado el 16 de octubre de 2018]. Disponible en: http://www.redproteger.com.ar/poder_calorifico.htm.

¹⁸¹ QUINTANA, Rafael. [Sitio web]. Poder Calorífico De Las Sustancias Más Comunes. [Consultado el 16 de octubre del 2018]. Disponible en: <https://cadascu.wordpress.com/2011/05/25/poder-calorifico-de-las-sustancias-mas-comunes/>

¹⁸² INSTITUTO NACIONAL DE SEGURIDAD E HIGIENE EN EL TRABAJO. Poder calorífico de diversas sustancias (Q). [En línea]. Ministerio del trabajo y asuntos sociales. [Citado el 16 de octubre del 2018]. Disponible en:

http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Normativa/TextosLegales/RD/2004/2267_04/Ficheros/tabla1_4.pdf

¹⁸³ GARCIA LIMA, Antonio Guilherme. [Sitio web]. Poder Calorífico. [Consultado el 16 de octubre del 2018]. Disponible en: <http://www.antoniolima.web.br.com/arquivos/podercalorifico.htm>

Mendoza¹⁸⁴, es un poder calorífico típico de gas de pirólisis por lo que se puede concluir que la influencia del hidrogeno sobre el poder calorífico final del gas es insignificante. Con base en este dato del poder calorífico del gas saliente del proceso es posible entonces calcular de manera aproximada la cantidad de madera en kilogramos que se requiere para poder cumplir con el requerimiento energético de 10 a 15 kWh de energía durante 6 horas continuas al día, sabiendo que el motor a utilizar contará con una eficiencia aproximada del 30%, que el generador a implementar tiene una eficiencia del 80% aproximadamente y finalmente que la eficiencia aproximada para el gas es de alrededor del 57% con base a los resultados de rendimiento expuesto en el capítulo anterior. En la ecuación 24 se puede observar el cálculo realizado para determinar el rango en kg de madera necesaria para cumplir con el requerimiento energético mencionado anteriormente.

Ecuación 24. Cantidad de madera requerida, proceso de pirólisis.

$$X (kg) * 1,105 \frac{kWh}{kg} * 0,57 * 0,3 * 0,8 = 10 kWh$$

$$X = 66,15 kg$$

$$X (kg) * 1,105 \frac{kWh}{kg} * 0,57 * 0,3 * 0,8 = 15 kWh$$

$$X = 99,23 kg$$

Con base en este cálculo se puede concluir que cada hora deberán ingresar de 66 a 99 kg de madera para cumplir con el requerimiento energético, en otras palabras, se necesitarán aproximadamente entre 396 kg y 594 kg de madera diaria, por lo que se haría obligatorio realizar un inventario de la cantidad de madera disponible que se podría obtener del río anualmente para verificar si esta cantidad de madera puede suplir la demanda de material de entrada al proceso para cumplir con la demanda energética.

4.2 PROPUESTA DE DISEÑO.

La construcción de la alternativa de diseño del proceso de pirólisis de madera húmeda para la producción de energía bajo los criterios de diseño planteados anteriormente, consta de una propuesta para el proceso de pretratamiento de la madera que incluye la operación de secado y reducción de tamaño, así mismo las condiciones de operación y dimensiones del reactor y finalmente la identificación de posibles usos para los productos líquido y sólido del proceso de pirólisis.

4.2.1 Pre-tratamiento de la madera. Las operaciones de pre-tratamiento de biomasa son de suma importancia para garantizar buenos procesos de conversión de la energía contenida en la fuente biomásica en energía útil; a continuación se

¹⁸⁴ MENDOZA Libardo. Fundación universidad de América. Bogotá, Colombia. Observación inédita, 2018.

determinan las especificaciones técnicas para las operaciones de secado y reducción de tamaño para madera con base en los resultados obtenidos en la parte experimental del proyecto anteriormente descrita, de la mano de los criterios de diseño, con el fin de que estas propuestas se ajusten al contexto real del proyecto.

4.2.1.1 Secado. “La madera empieza a perder agua desde el momento en que se tala el árbol. En primer lugar, se evapora el agua de imbibición de la parte exterior (albura) y, después, la de las partes internas (duramen) del tronco. En un cierto punto toda el agua libre de la madera seca se evapora, mientras que el agua de saturación llega a un equilibrio dinámico con la humedad exterior, alcanzando un valor inferior al 20%”¹⁸⁵. Como se mencionó en el capítulo anterior garantizar bajos porcentajes de humedad en la madera aseguran mejores rendimientos en los procesos de conversión termoquímica en este caso en el proceso de pirólisis ya que “durante el secado, la reducción de la humedad en un 10% supone aproximadamente a un aumento de 0,6 kWh/kg (2,16 MJ/kg) en el contenido energético”¹⁸⁶. Por lo anterior se debe plantear una operación de secado que garantice porcentajes de humedad por debajo del 12 %, porcentaje requerido para biomasa que será transformada mediante tratamientos termoquímicos como lo es la pirólisis. El secado de una fuente biomásica se puede realizar de manera natural; este secado consiste en “dejar que el material pierda humedad hacia el ambiente que le rodea. Necesita que las condiciones climáticas sean medianamente favorables: humedad relativa baja, escasez de lluvias y calentamiento solar”¹⁸⁷; mediante este mecanismo es posible entonces una reducción de humedad que según Álvarez¹⁸⁸, es de entre el 8 y el 18 por 100 como valores extremos, es decir que un buen proceso de secado al aire libre puede garantizar una humedad menor al 12%, valor óptimo de humedad para fuentes biomásicas con fines térmicos.

A pesar de que buenos procedimientos de secado al aire libre pueden llegar sin ayuda de un secado artificial o forzado a la humedad óptima para el proceso posterior de conversión mediante pirólisis, se decide plantear una operación de secado artificial por cuatro razones principalmente: la primera de ellas es bajo la premisa de que la humedad relativa de la zona en cuestión (Resguardo Yaigojé en el Vaupés colombiano) es alta, ya que según el IDEAM¹⁸⁹, esta región cuenta con un promedio de humedad relativa anual de alrededor del 88% (Ver mapa de promedio de humedad relativa en Colombia, anexo C), por lo que llegar a la humedad requerida inferior al 12% únicamente mediante el secado al aire libre podría dificultarse, en segunda instancia por que el secado al aire libre requiere de

¹⁸⁵ FONTANOR, S. L. [Sitio web]. Calderas de leña. [Consultado el 3 de octubre del 2018]. Disponible en: <http://www.fontanor.com/index.php/fontaneria-y-calefaccion/10-fontacale/8-calderas-de-lena>

¹⁸⁶ *Ibid.*, párr. 11.

¹⁸⁷ NOGUES, Fernando Sebastián; GARCÍA GALINDO, Daniel y REZEAU, Adeline. *Energía de la Biomasa*. 1ª ed. Zaragoza, España: Prensas universitarias de Zaragoza, 2010. 49 p. ISBN: 978-84-92774-91-3

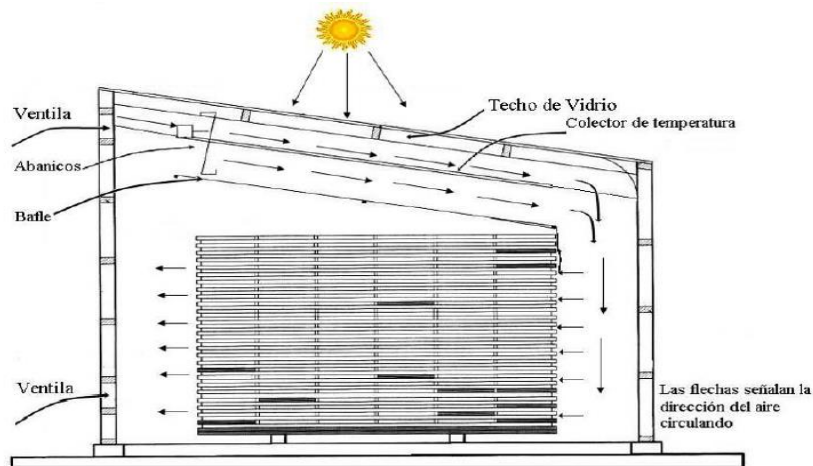
¹⁸⁸ ÁLVAREZ NOVES, Humberto. *Secado De La Madera Al Aire*. [En línea]. Madrid, España. Disponible en: https://www.miteco.gob.es/ministerio/pags/biblioteca/hojas/hd_1984_19.pdf, p. 5.

¹⁸⁹ IDEAM. [Sitio web]. Bogotá, Atlas Climatológico de Colombia. [Consultado el 16 de octubre del 2018]. Disponible en: <http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/atlas>.

una disposición del material en este caso de la madera en forma de tablas, lo que necesariamente obligaría a realizar un tratamiento previo al secado, de adecuación del recurso maderero en tablas, procedimiento que al no tener maquinaria especializada sería muy complejo de realizar de forma manual, por otra parte el secado al aire libre requiere de un tiempo más prolongado que un secado forzado y pensando en la cantidad de madera diaria que se debería secar, es más conveniente pensar en un sistema más eficiente que disminuya esos tiempos de secado, finalmente los procesos de secado natural requieren infraestructuras de techo que impidan el humedecimiento de la madera por precipitaciones y otros factores climáticos, estructuras que no serían de factible construcción dentro del contexto del proyecto ya que en primer lugar se debe buscar minimizar el transporte de material pesado a la zona bajo la premisa de su difícil acceso y en segundo lugar porque existen técnicas de secado artificiales que garantizan bajos porcentajes de humedad y que tienen una mayor facilidad de construcción e implementación como por ejemplo los secadores de madera solares.

Este tipo de secadores, “son cámaras que tienen la capacidad de almacenar el calor que es generado por la incidencia de los rayos solares sobre un colector de temperatura”¹⁹⁰. En términos generales este tipo de secadores busca que el calor que se almacena se utilice en el proceso de secado de la madera. Como se puede observar en la figura 15, “las cámaras de secado tienen dos partes fundamentales: la primera se ubica en la parte superior de la cámara y es la responsable de que el aire se caliente; la segunda es el área de apilado de la madera que se requiere secar”¹⁹¹.

Figura 15. Principio general de un secador solar para madera.



Fuente: SALAS GARITA, Cynthia, MOYA ROQUE, Roger y CORDOBA FOGLIA, Rafael. Diseño y construcción de un secador solar para madera. Instituto Tecnológico de Costa Rica, 2012. p. 2.

¹⁹⁰ SALAS GARITA, Cynthia, MOYA ROQUE, Roger y CORDOBA FOGLIA, Rafael. Diseño y construcción de un secador solar para madera. Instituto Tecnológico de Costa Rica, 2012. p. 2.

¹⁹¹ *Ibíd.*, p. 3.

Este tipo de tecnologías a pesar de que son muy simples en cuanto a diseño y funcionamiento, “requieren de algún grado de control de las condiciones internas de temperatura y humedad relativa. Esto es posible gracias a la instalación de ventanas o ventilas que permitan intercambiar el aire húmedo de la cámara por aire más seco del exterior de la cámara”¹⁹².

Los secadores solares pueden clasificarse en función del tipo de circulación de aire, teniendo entonces los secadores activos y los secadores pasivos.

- Secadores activos: En este tipo de secadores “el aire es movido mediante circulación forzada con ventiladores. Tienen la ventaja de que la velocidad de circulación del aire que se puede conseguir con estos secadores es mayor”¹⁹³.
- Secadores pasivos: En este caso “la circulación de aire es movida por la flotabilidad natural del aire caliente frente al aire frío. Esta forma de circulación tiene la ventaja de ser más económica y sencilla, pero conlleva una mayor dificultad en controlar las condiciones higrotérmicas dentro de la cámara de secado”¹⁹⁴.

Por otra parte, en función del modo de utilización de la energía solar, este tipo de secadores pueden clasificarse como: de tipo directo, indirecto y mixto.

- Secado solar directo: En este método “los rayos solares inciden directamente sobre el cuerpo a secar, son los sistemas más sencillos ya que no necesitan mecanismos de circulación de aire ni paneles solares. Sin embargo la exposición directa de radiación solar a la madera puede causar en algunos casos decoloraciones superficiales”¹⁹⁵.
- Secado solar indirecto: En este tipo de secadores “los rayos solares no inciden en el cuerpo a secar, sino que inciden en un colector térmico, normalmente un colector de aire. A través de dicho colector de aire pasará el aire que atravesará más tarde la pila de madera. Este tipo de secadores proporciona un mayor control sobre el proceso, y permite y pueden conseguir grandes flujos de aire caliente”¹⁹⁶.
- Secado solar mixto: Este es una mezcla de los dos anteriores. “En este tipo de secadores se hace incidir la radiación solar directamente sobre el producto a

¹⁹² *Ibíd.*, p. 3.

¹⁹³ GARCIA RUIZ, José Manuel. Estudio y construcción de una instalación de secado de madera mediante energía solar térmica. [En línea]. Tesis de grado. Universidad Carlos III de Madrid. p. 32. [Consultado 25 de octubre 2018]. Disponible en: <https://core.ac.uk/download/pdf/30045364.pdf>

¹⁹⁴ *Ibíd.*, p. 32.

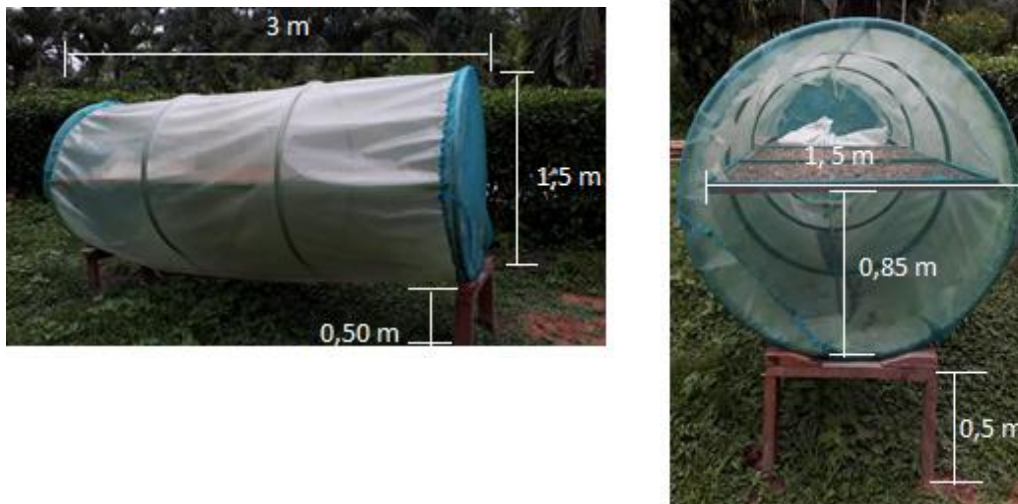
¹⁹⁵ *Ibíd.*, p. 32.

¹⁹⁶ *Ibíd.*, p. 32.

secar y también disponen de colector térmico, que calienta el aire que se hará circular posteriormente por la pila de madera”¹⁹⁷.

Con base en lo anterior, el proceso de secado de madera se realizará mediante un secador solar indirecto-pasivo, ya que se utilizará un mecanismo alterno para calentar el aire que posteriormente será el encargado de secar la madera, que para este caso será plástico (Ver imágenes 15 y 16), el cual actuara como invernadero y además no se contará con la circulación forzada del aire. El diseño del secador solar de madera se basa en los secadores solares implementados en la finca La Cosmopolitana¹⁹⁸ ubicada a las afueras de la ciudad de Villavicencio en el Kilómetro 7.5 Vía San Nicolás, Restrepo – Meta, en esta finca durante varios años han realizado operaciones de secado de distintos materiales de manera exitosa, entre los cuales están, astillas de madera, hojas, semillas y troncos de madera.

Imagen 15. Secador solar circular.



Fuente: Elaboración propia.

Imagen 16. Secador solar cuadrado.



Fuente: Elaboración propia.

¹⁹⁷ *Ibíd.*, p. 32.

¹⁹⁸ LA COSMOPOLITANA. [Sitio web]. Villavicencio. [Consulta: 25 octubre 2018]. Disponible en: <http://www.lacosmopolitana.com/es/>

Como se puede observar es importante que el secador solar este ubicado según Álvarez¹⁹⁹, a no menos de 0,50 metros del suelo; Por otra parte se recomienda en cuanto al suelo en donde se construye el secador que este debe estar “desprovisto de trozos de madera viejos, hierbas, etc., puesto que estos favorecen el ataque de hongos e insectos. A ser posible, el terreno del parque de secado deberá asfaltarse o construirse de arena compactada”²⁰⁰. Finalmente, en cuanto al tiempo de secado de la madera, este dependerá de la “especie y del grosor de las tablas, además de la variación de las condiciones climáticas. Por estas razones, es necesario hacer las pruebas de pesado, para ir conociendo el funcionamiento de la estufa solar. Con el tiempo y la práctica se podrá calcular un aproximado de los días necesarios para el secado de cada especie y tipo de madera”²⁰¹.

4.2.1.2 Reducción de tamaño. La operación de reducción de tamaño de partícula, como se mencionó en el capítulo anterior, es una operación que mejora los procesos de transferencia de calor y masa dentro del reactor de pirólisis; sin embargo implementar una molienda para llegar a madera aserrada como se realizó en la experimentación anteriormente descrita (ver capítulo 3), en donde por la capacidad y disposición del reactor empleado no era posible ingresar el trozo completo de madera, no es un proceso replicable a la hora de visualizar el proyecto a largo plazo, ya que el traslado y compra de equipos de molienda para ser utilizados en el resguardo es complejo, además este tipo de proceso según Barragán²⁰², permite el ingreso de la biomasa en trozos más grandes; por lo que pensar en la opción de una reducción de tamaño fraccionando los troncos de madera con ayuda de sierras eléctricas como se puede observar en la imagen 17, bastaría para poder realizar el proyecto sin necesidad de acudir a operaciones de molienda específicamente.

Imagen 17. Reducción de tamaño de troncos de madera.



Fuente: Elaboración propia.

¹⁹⁹ ÁLVAREZ NOVES, Humberto. Secado De La Madera Al Aire. [En línea]. Madrid, España. Disponible en: <https://www.miteco.gob.es/ministerio/pags/biblioteca/hojas/hd_1984_19.pdf>. 19 p.

²⁰⁰ *Ibíd.*, p. 19.

²⁰¹ BÁRCENAS PAZOS, Guadalupe M; MARTÍNEZ CASTILLO, José Luis; RODRÍGUEZ DE ANDA, Raúl; QUINTANAR OLGUÍN, Juan y AUGUSTIN GRELLMANN, Karl. Estufa solar de secado de madera. [En línea]. México: CONAFOR. [Consultado en 6 de noviembre del 2018]. Disponible en: <http://www.conafor.gob.mx/BIBLIOTECA/secado-madera.pdf>

²⁰² BARRAGAN Iván. Bogotá, Colombia. Observación inédita, 2018.

4.2.2 Caracterización del reactor. El reactor a caracterizar es un reactor tipo SemiBatch como el utilizado en el desarrollo experimental descrito en el capítulo 3, ya que de este tipo de reactor es que se conoce su funcionamiento y rendimiento del proceso en cuanto a la utilización de madera como materia prima.

En términos generales un reactor SemiBatch es “un tipo de reactor caracterizado por poseer un estanque cubierto por una chaqueta calefactora y en la mayoría de los casos, por poseer un dispositivo de agitación mecánico”²⁰³. El principal inconveniente de este tipo de reactores es que al no tener un flujo de gas inerte que desplace a los productos volátiles que se generan en el proceso de pirólisis, se pueden generar reacciones secundarias (como lo son aromatizaciones o ciclaciones) no deseadas, que puede afectar el rendimiento del proceso; generando la aparición de compuestos aromáticos y cíclicos no deseados como efectivamente se comprobó al caracterizar el gas saliente del proceso; sin embargo este tipo de reactor favorecería el proceso por la sencillez en la construcción, implementación y operación del equipo.

Con base en lo anterior y sabiendo que el reactor utilizado durante la experimentación tiene una capacidad máxima de 1,5 kg (4 L) y dimensiones de 15 cm de diámetro por 40 cm de altura, además de un grosor en cuanto a la pared del reactor de 57 mm (0,57cm), se determina entonces una relación entre el diámetro y la altura como se puede observar en la ecuación 25.

Ecuación 25. Relación diámetro altura.

$$\text{Factor} = \frac{\text{Diámetro (m)}}{\text{Altura (m)}}$$

$$0,375 = \frac{0,15 \text{ m}}{0,40 \text{ m}}$$

Este factor que representa la relación entre el diámetro y la altura, deberá mantenerse constante para el reactor que se va a escalar; por otra parte se sabe que el nuevo reactor deberá albergar no 1,5 kg como el implementado en el laboratorio sino aproximadamente 67 kg para cumplir la demanda de 10 kWh; por ende para conocer el equivalente en volumen que se necesita para albergar los 67 kg de madera sabiendo que en 4 L el reactor tiene una capacidad de 1,5 kg, como se observa en la ecuación 26 se determina el volumen en metros cúbicos correspondiente al reactor escalado.

Ecuación 26. Calculo del volumen del reactor para 67 kg.

$$4 \text{ L} \rightarrow 1,5 \text{ kg}$$

$$x \rightarrow 67 \text{ kg}$$

$$x (\text{Volumen L}) = 178,66 \text{ L} = 0,17866 \text{ m}^3$$

²⁰³ GARRIDO SZEGEDI, Pablo Javier. Diseño e implementación de un reactor continuo para la degradación química de polímeros. Universidad de Chile, 2013. p. 24-34.

Conociendo entonces el volumen y la masa del reactor escalado y sabiendo que la relación diámetro altura debe mantenerse (0,375), se pueden entonces calcular las dimensiones correspondientes al diámetro y la altura para el nuevo reactor como se puede observar en la ecuación 27.

Ecuación 27. Cálculo de las dimensiones del reactor.

$$\text{Volumen cilindro} = \pi r^2 h$$

$$0,17866 \text{ m}^3 = \pi r^2 h$$

$$0,375 = \frac{d}{h} = \frac{2r}{h}$$

$$h = \frac{2r}{0,375}$$

$$0,17866 \text{ m}^3 = \pi r^2 \left(\frac{2r}{0,375} \right)$$

$$0,17866 \text{ m}^3 = \frac{2\pi r^3}{0,375}$$

$$r = 0,22010 \text{ m}$$

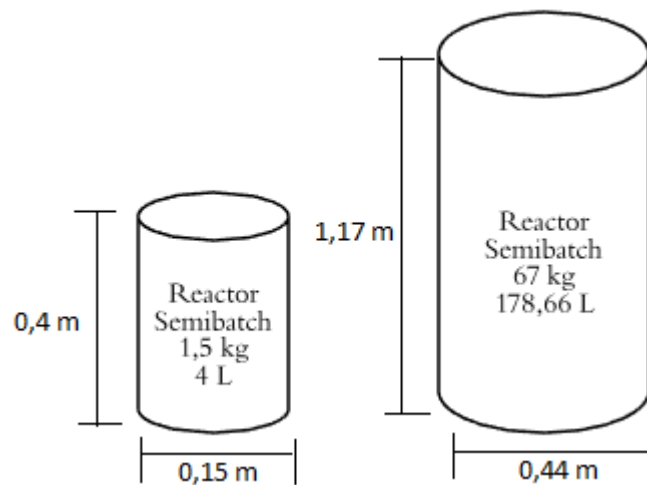
$$\mathbf{d = 0,44020 \text{ m}}$$

$$h = \frac{d}{0,375}$$

$$\mathbf{h = 1,17388 \text{ m}}$$

Con base en los resultados anteriores tenemos que para procesar una cantidad de 67 kg de madera bajo los mismos principios del reactor SemiBatch utilizado en la experimentación, se tiene un reactor de 0,44 m de diámetro y 1,17 m de altura como se puede observar en el diagrama 6.

Diagrama 6. Dimensiones del reactor.



Fuente: Elaboración propia.

Como se observa en el diagrama anterior, el nuevo reactor es casi 3 veces más grande que el empleado en la experimentación en términos de sus dimensiones; Por otra parte, en cuanto a las condiciones de operación que manejarían los reactores, según los resultados obtenidos en la experimentación, se tienen las siguientes especificaciones técnicas:

- Temperatura de operación: 700°C
- Presión: Atmosférica (Resguardo Yaigojé Apaporis).
- Tiempo de residencia: 3 horas.
- Tipo de operación: SemiBatch.

A pesar de que el proceso realizado en laboratorios Calderón tuvo un tiempo de residencia de 4 horas, como se puede observar en el anexo B, luego de un tiempo aproximado de 3 horas cesaba el burbujeo indicando que las reacciones habían terminado, por lo que pensar en operar 1 hora adicional el reactor no tiene sentido si ya ha finalizado el proceso.

Finalmente, con base en los rendimientos normalizados para pirólisis obtenidos en el capítulo anterior los cuales corresponden a 28,73% para el sólido, 13,034% para el líquido y 57,54% para el gas aproximadamente, es posible entonces estimar una distribución en términos de masa (kg) de los 3 productos salientes del proceso esta vez para una alimentación de 67 kg, la cual como se mencionó anteriormente es la mínima necesaria para cumplir con el requerimiento energético de 10 kWh; Los resultados del cálculo del rendimiento para la nueva alimentación se pueden observar en la tabla 38.

Tabla 38. Distribución aproxima de productos de pirólisis para una alimentación de 67 kg.

Alimentación (kg)	Sólido (kg)	Líquido (kg)	Gas (kg)
67	19,2491	8,7327	38,5518

Fuente: Elaboración propia.

Con base a los resultados anteriores se puede estimar entonces la cantidad de sólido, líquido y gas que se obtendría a partir de esta alimentación, en donde el producto mayoritario efectivamente sigue siendo el producto gaseoso quien finalmente es el de mayor interés.

4.2.3 Usos productos pirólisis. Finalmente se determina el posible uso para los productos salientes del proceso de pirólisis de madera tropical, con el fin visualizar completamente el ciclo del proceso y generar alternativas prácticas que permitan el mayor aprovechamiento de los productos del proceso en su totalidad.

4.2.3.1 Producto sólido (Biochar). El carbón vegetal o Biochar, se define como “un material sólido carbonoso que queda después de la pirólisis; es un material poroso, largamente resistente a la descomposición (mineralización), usualmente

alcalino, compuesto principalmente de carbono, materiales orgánicos, cenizas y alguna fracción de material volátil²⁰⁴.

Dentro de los beneficios que tiene este carbón vegetal resaltan según Silva Lora y Rincón Martínez²⁰⁵: el secuestro de carbono, la reducción de estrés hídrico, la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, la reducción en la cantidad de fertilizantes inorgánicos, entre otros.

El concepto de Biochar o carbón vegetal es relativamente reciente, y existe en la actualidad un gran interés en su aplicación sobre suelos con fines agrarios como fertilizante; el interés en esta área se debe principalmente al “descubrimiento de sustancias de naturaleza similar al biochar en tierras oscuras de la Amazonia, conocidas localmente como *Terra preta do indio*. Estos suelos son ricos en C orgánico y muy fértiles, lo que representa una anomalía respecto a los suelos de la selva Amazónica que suelen ser muy pobres en nutrientes²⁰⁶. Por lo tanto, el uso de Biochar como fertilizante y recuperador de suelos, permite no solo un aumento significativo en el contenido de nutrientes de este, sino además influye sobre la acidez de suelos debido a la natural alcalinidad de este compuesto, por otra parte el Biochar actúa como secuestrador de carbono aumentando la capacidad del suelo de convertirse en un sumidero de carbono ya que “la adición de biochar al suelo se ha planteado como una opción viable de reducir la concentración de CO₂ atmosférico, favoreciendo la retención de C en el suelo²⁰⁷; esta influencia del Biochar sobre la concentración de dióxido de carbono atmosférico se debe a “su naturaleza recalcitrante, lo que ralentiza la velocidad a la que se degrada en el suelo y por tanto la velocidad a la que el C se emite a la atmósfera²⁰⁸, influyendo sobre el ciclo del carbono.

Por otra parte, adicional al uso del biochar como agente fertilizante y reparador de suelos, se puede aprovechar la capacidad adsorbente de este producto para reducir la importante carga de alquitranes con la que el gas producto del proceso de pirólisis sale del reactor los cuales logran pasar a la fase volátil del proceso y salir de él en forma de gas; la presencia de este tipo de compuestos en el gas cuyo uso posterior es el de alimentar a un motor de combustión interna para luego producir energía eléctrica mediante un generador, puede ocasionar problemas dentro del motor ya que este tipo de compuestos al condensarse pueden generar obstrucciones y problemas de corrosión por su carácter ácido, ocasionando daños al equipo; por esta razón se sugiere hacer pasar el gas antes de su ingreso al motor

²⁰⁴ SILVA LORA, Electo Eduardo y RINCON MARTINEZ, José María. Bioenergía Fuentes, conversión y sustentabilidad. Bogotá D.C: Red Iberoamericana de Aprovechamiento de Residuos Orgánicos en Producción de Energía, 2014. p. 204. ISBN 978-958-58880-0-5.

²⁰⁵ *Ibíd.*, p. 205.

²⁰⁶ OLMO PRIETO, Manuel. Efectos del biochar sobre el suelo, las características de la raíz y la producción vegetal. [En línea]. Tesis doctoral. Universidad de Córdoba, 2016. p. 32-33. [Consultado 26 de octubre 2018]. Disponible en: <https://helvia.uco.es/xmlui/bitstream/handle/10396/13381/2016000001398.pdf?sequence=1>

²⁰⁷ *Ibíd.*, p. 36

²⁰⁸ *Ibíd.*, p. 36.

por una capa del biochar en donde por medio de su capacidad adsorbente retenga el residual de alquitranes presentes en el gas y de esta manera asegurar que la carga de estos productos sea mínima y no ocasione daños dentro del motor.

4.2.3.2 Producto líquido. El producto líquido obtenido del proceso de pirólisis, a pesar de no ser el producto de interés dentro del proyecto, es un producto que luego de posteriores tratamientos tiene un poder combustible importante. La composición de este tipo de producto a partir de madera como fuente de biomasa al proceso se puede observar en la tabla 39.

Tabla 39. Propiedades físicas de los bioaceites obtenidos a partir de pirólisis de biomasa.

Propiedad	Unidades	Valores
Densidad	Kg/litros	1,1-1,3
Poder calorífico inferior	MJ/kg	13-18
Viscosidad dinámica	cSt	13-80 (a 50°C)
Conductividad térmica	W/mK	0,35-0,43
Capacidad calorífica	KJ/kg*k	2,6-3,8 (a 25-60°C)
Agua	(% en peso)	15-30
Punto de ignición	°C	110-120
Ph	-	2,0-3,7
Gravedad especifica	-	1,20

Fuente: Modificado por el autor con base en SILVA LORA, Electo Eduardo y RINCON MARTINEZ, José María. Bioenergía fuentes, conversión y sustentabilidad. Bogotá D.C: Red Iberoamericana de Aprovechamiento de Residuos Orgánicos en Producción de Energía, 2014. p. 202. ISBN 978-958-58880-0-5.

Como se puede observar el poder calorífico de este producto es significativo, por lo que su uso como combustible es atractivo, sin embargo la utilización de los bioaceites obtenidos por pirólisis de biomasa no puede realizarse de manera directa, por lo que según Silva Lora²⁰⁹, procesos de limpieza o refinado son necesarios y se realizan con el fin de mejorar las propiedades del bioaceite como combustible para su posterior uso en motores y turbinas.

Uno de los procesos de refinado más comunes en este tipo de productos es la filtración, y se realiza con el objetivo de disminuir la viscosidad y el peso molecular promedio del líquido, esto se hace mediante “la filtración del bioaceite en estado de vapor a alta temperatura reduciendo su contenido de cenizas a menos de 0,01% y el contenido de álcalis a menos de 10 ppm”²¹⁰. Por otro lado la adición de solventes es un mecanismo que reduce la viscosidad del bioaceite por ejemplo mediante la

²⁰⁹ SILVA LORA, Electo Eduardo y RINCON MARTINEZ, José María. Bioenergía fuentes, conversión y sustentabilidad. Bogotá D.C: Red Iberoamericana de Aprovechamiento de Residuos Orgánicos en Producción de Energía, 2014. p. 203. ISBN 978-958-58880-0-5.

²¹⁰ *Ibíd.*, p. 203.

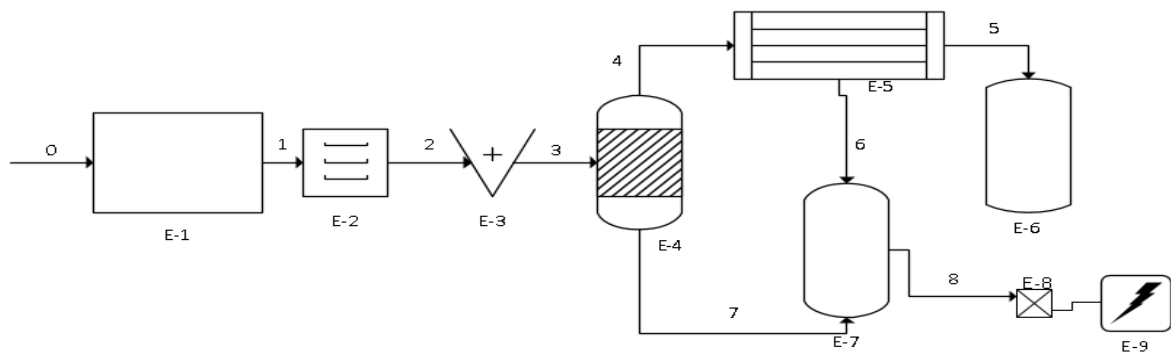
utilización de metanol, el cual influye significativamente según Silva Lora²¹¹, en la viscosidad del producto líquido de pirólisis por ende en su estabilidad.

En conclusión se puede decir que los procesos de refinado del producto líquido obtenido por pirólisis en este caso de madera, buscan la disminución de la viscosidad del bioaceite con el fin de estabilizar el producto y mejorar sus propiedades como combustible, por lo que se recomienda la implementación de procesos secundarios de refinado para aprovechar el poder combustible del bioaceite con el fin de que pueda ser utilizado en motores de combustión interna para ser aplicados al transporte de la zona de manera paralela al transporte eléctrico que se busca suplir mediante el uso del gas producto de la pirólisis.

4.2.3.3 Producto Gaseoso. Como se mencionó anteriormente el gas es el producto de mayor interés para el proyecto de investigación y será utilizado en su totalidad para la producción de energía eléctrica mediante el uso de un motor de combustión interna y posteriormente un generador, para la producción de 10 a 15 kW durante 6 horas diarias aproximadamente de manera continua; el gas sale del producto con una carga importante de alquitranes los cuales para fines de combustión interna no son muy convenientes, por lo que procesos de filtración del gas que disminuyan esa carga de alquitranes se recomienda para mejorar la calidad del gas como combustible de un motor de combustión interna.

4.2.4 Diagrama PFD. El proceso de pirólisis anteriormente planteado, el cual consta de dos operaciones de pre tratamiento de la madera (secado y reducción de tamaño) y la parte de reacción la cual constara de 5 reactores en paralelo con su respectivo sistema de condensación y almacenamiento, se puede ver reflejado mediante el siguiente diagrama PFD (ver diagrama 7), así mismo la función y nombre de los equipos y las corrientes de proceso pueden observarse en las tablas 40 y 41 respectivamente.

Diagrama 7. Diagrama PFD, proceso de pirólisis de madera.



Fuente: Elaboración propia.

²¹¹ *Ibíd.*, p. 203.

Tabla 40. Descripción y función de equipos.

Equipo	Descripción	Operación
E-1	Tanque cerrado	Almacenamiento de la madera recolectada
E-2	Secador	Secado solar de madera
E-3	Trituradora	Fraccionamiento madera
E-4	Reactor	Reacción de pirólisis
E-5	Condensador	Disminución de la temperatura
E-6	Contenedor Liq.	Recolectar producto líquido
E-7	Torre de adsorción	Recolectar producto sólido para posterior filtrado del gas
E-8	Motor	Combustión interna de gases
E-9	Generador	Generación de energía eléctrica

Fuente: Elaboración propia

Por otra parte, en la tabla 41 se pueden evidenciar las 8 corrientes que conforman el proceso anteriormente descrito en el diagrama 7 y su respectiva descripción.

Tabla 41. Corrientes de proceso.

Corriente	Descripción
0	Alimentación al proceso
1	Madera a secar
2	Madera seca
3	Madera fraccionada, alimentación reactor
4	Salida de compuestos volátiles, alimentación al condensador
5	Producto líquido
6	Producto gaseoso a ser filtrado
7	Producto sólido
8	Gas filtrado, alimentación al motor

Fuente: Elaboración propia.

4.3 PROPUESTA ALTERNATIVA DE DISEÑO.

Se realiza una propuesta alternativa de diseño, teniendo en cuenta que si el producto que se desea obtener mayoritariamente y con mejores características como combustible es el gas, es posible pensar en alternativas paralelas al proceso de pirólisis en donde este producto mejore sus rendimientos y calidad; este proceso es la gasificación, el cual al igual que la pirólisis es un proceso de conversión termoquímica de la biomasa, en donde por acción de altas temperaturas y en presencia de un agente gasificante, “permite convertir la biomasa sólida en un gas combustible con eficiencias en el rango 60% a un 90%”²¹². Por otra parte se tiene

²¹² *Ibíd.*, p. 169.

que el aprovechamiento energético de este gas producto del proceso de gasificación puede hacerse mediante la quema inmediata en una cámara de combustión o introduciendo el gas en una turbina o un motor de combustión interna; con base en el objetivo final del presente proyecto de investigación se puede concluir entonces que “mediante gasificación se pueden alcanzar rendimientos eléctricos de hasta un 30-32% mediante el uso de moto-generadores accionados por syngas”²¹³.

El proceso de gasificación inicia Según Silva Lora²¹⁴, con el calentamiento de las partículas de biomasa, lo que provoca la liberación del contenido de humedad presente en la biomasa en forma de vapor; de manera simultánea inicia el proceso de pirólisis, en donde como se explicó anteriormente se da lugar a la descomposición térmica de la materia orgánica contenida en la biomasa en ausencia de oxígeno; luego de esto el residuo sólido que se forma en la pirólisis (biochar), es atacado por el agente oxidante que para este caso sería aire, con el fin de producir gas de síntesis o el también llamado syngas, un producto rico en monóxido de carbono (CO) e hidrógeno (H₂), con un poder calorífico superior al del gas producido en la pirólisis, ya que según Mendoza²¹⁵, el poder calorífico de un gas típico de pirólisis ronda los 4 MJ/kg respecto a poderes caloríficos del orden de 16-18 MJ/kg que se logran obtener mediante el proceso de gasificación.

Este aumento en el poder calorífico del gas mediante la implementación del proceso de gasificación, se puede ver reflejado en la disminución de la cantidad de madera que debería ingresar al proceso para cumplir con el objetivo de producir de 10 a 15 kW de energía durante 6 horas continuas diariamente a partir del gas combustible saliente del proceso. Sabiendo entonces el poder calorífico característico de un gas de síntesis producto del proceso de gasificación (16-18 MJ/kg; 4,44 kWh/kg), conociendo el rendimiento típico de este proceso el cual “varía dependiendo de la tecnología, el combustible y el agente gasificante que se utilice, en el rango de 70-80%”²¹⁶ y finalmente tomando las mismas eficiencias para el motor y el generador utilizadas para el cálculo de la cantidad de madera necesaria para cumplir la demanda energética a partir del proceso de pirólisis (0,3 y 0,8 respectivamente), se puede calcular entonces la cantidad de madera en kg necesaria, sabiendo que el rendimiento para el gas mediante un proceso de gasificación es según Klug²¹⁷ de alrededor del 85%, como se puede observar en la elución 28.

²¹³ IDAE. Biomasa: Gasificación. Madrid: Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, 2007. p. 7. ISBN 978-84-96680-20-3. [Consultado en 8 de noviembre del 2018]. Disponible en:

http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_10737_Biomasa_Gasificacion_A2007_596f03d5.pdf

²¹⁴ SILVA LORA. Op. Cit., p. 169.

²¹⁵ MENDOZA Libardo. Fundación universidad de América. Bogotá, Colombia. Observación inédita, 2018.

²¹⁶ IDAE. Op. Cit., p. 6.

²¹⁷ Klug. Op. Cit., p. 38.

Ecuación 28. Cantidad de madera requerida, proceso de gasificación.

$$X (kg) * 4,44 \frac{kWh}{kg} * 0,85 * 0,3 * 0,8 = 10 kWh$$

$$X = 11,040 kg$$

$$X (kg) * 4,44 \frac{kWh}{kg} * 0,85 * 0,3 * 0,8 = 15 kWh$$

$$X = 16,560 kg$$

Como se puede observar la cantidad de madera necesaria para cumplir la demanda energética mediante la implementación del proceso de gasificación es evidentemente mucho menor comparada con la cantidad de madera en kg requerida para suplir la misma demanda energética mediante el proceso de pirólisis; esta diferencia en la cantidad de madera radica básicamente en la diferencia en el valor del poder calorífico del gas que se puede obtener a partir de cada uno de los dos procesos, el cual es casi 4 veces mayor para gasificación (4,44 kWh/kg) que para pirólisis (1,105 kWh/kg), por ende se necesitaran menos cantidad de madera en el proceso de gasificación que en el proceso de pirólisis, esto influirá básicamente en el tamaño del equipo el cual será mucho menor en el proceso de gasificación.

Por otra parte se tiene que una de las mayores limitaciones que tiene la implementación de esta tecnología está en la “necesidad de implementar un sistema de limpieza del gas que además de los elementos combustibles contiene impurezas que pueden ocasionar problemas de contaminación ambiental”²¹⁸. Por ende, estos sistemas de limpieza están destinados especialmente para lograr eliminar el alquitrán y el material particulado, en especial cuando como en este caso su aplicación posterior será la de generar energía eléctrica en motores; para la solución de este inconveniente se plantea la filtración del gas propuesta para el proceso de pirólisis, en donde con ayuda de la capacidad adsorbente del carbón vegetal se disminuya la carga de alquitranes y material particulado presente en el gas.

Al igual que en el proceso de pirólisis anteriormente descrito, en la gasificación son necesarios los procesos de pre tratamiento de la biomasa antes de su ingreso al reactor con el fin de garantizar altas eficiencias, por ende en primer lugar la operación de secado debe asegurar porcentajes de humedad inferiores al 12% por lo que se propone implementar para esta propuesta de diseño el mismo proceso de secado planteado para el diseño de pirólisis mediante la implementación de secadores solares de madera para lograr el porcentaje de humedad requerido en el proceso; en segundo lugar en cuanto a la reducción el tamaño de partícula, el proceso de gasificación a diferencia de la pirólisis la cual tolera tamaños de partícula grandes, requiere de tamaños de partícula más pequeños los cuales según Barragán²¹⁹, no deben superar los 5 cm.

²¹⁸ SILVA LORA. Op. Cit., p.186.

²¹⁹ BARRAGAN, Iván. Bogotá, Colombia. Observación inédita, 2018.

Por lo tanto es necesaria la implementación de un sistema de reducción de tamaño de partícula un poco más riguroso que el planteado anteriormente para el proceso de pirólisis; para esto se considera el uso de maquinaria sencilla para fraccionar la madera como la implementada en el proyecto de generación de energía eléctrica en Necocli²²⁰ a partir de residuos madereros (Ver figura 16).

Figura 16. Operación de reducción de tamaño de partícula.



Fuente: DELGADO, Jorge. Necocli, Gasificación de la biomasa leñosa. [Video]. [Consultado en 8 de noviembre del 2018]. Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=-f5NdhJ7rE>

Una vez fraccionados los troncos de madera mediante la implementación de sierras eléctricas, se recomienda la implementación, por ejemplo, astilladoras de madera con el fin de alcanzar tamaños de partícula más pequeños y de esta manera asegurar el correcto funcionamiento del equipo, como se puede observar en la figura 17.

Figura 17. Astillado de la madera.



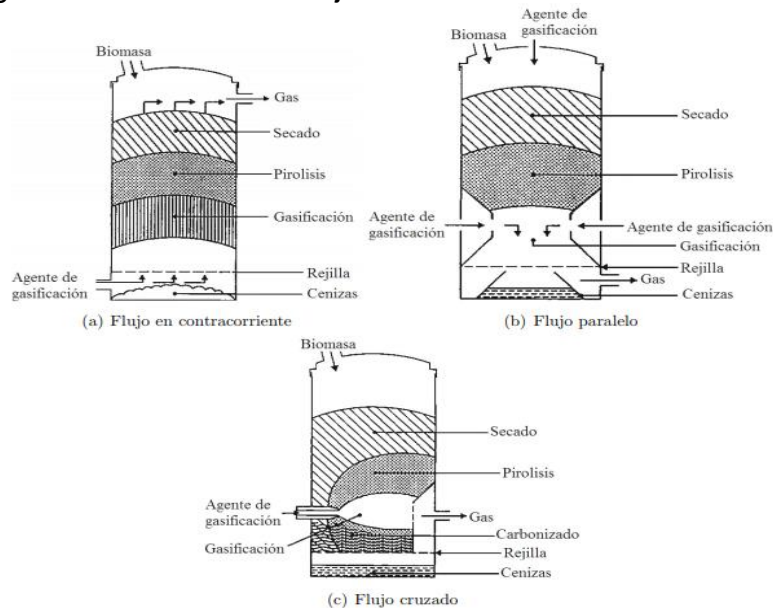
Fuente: RIPPE, Hanz. Gasificador Jardín Botánico. [Video]. [Consultado en 8 de noviembre del 2018]. Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=MpIYIsLCpV4>

En cuanto al tipo de gasificador a emplear se propone uno de lecho fijo, ya que es la tecnología de gasificación más sencilla y pensando en la dificultad de la zona donde este operaría se considera la mejor alternativa. Los gasificadores de lecho fijo suelen ser implementados en procesos cuya alimentación se realiza por lotes y su funcionamiento se resume a una “cama fija de partículas sólidas de biomasa a través de las cuales se mueve el agente de gasificación. En los reactores de lecho

²²⁰ DELGADO, Jorge. Necocli, Gasificación de la biomasa leñosa. [Video]. [Consultado en 8 de noviembre del 2018]. Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=-f5NdhJ7rE>

fijo la fase sólida se mueve lentamente hacia la parte baja del reactor, a medida que ocurre la descomposición de la biomasa. Este tipo de gasificadores presentan las condiciones técnicas más simples, siendo relativamente fáciles de diseñar y de operar²²¹. Por otra parte se tiene que este tipo de reactores son “especialmente apropiados para la producción de energía a pequeña y mediana escala, esto debido a que la composición del gas generado puede ser impredecible y poco eficiente para producciones a gran escala (superior a 1 MW)”²²², sin embargo al ser el requerimiento energético deseado relativamente pequeño, este proceso y tipo de gasificador se adapta adecuadamente a las condiciones de proceso que se necesitan; en la figura 18 se pueden observar los diferentes esquemas para gasificadores de lecho fijo.

Figura 18. Esquema de los diferentes tipos de gasificadores de lecho fijo.



Fuente: GARCIA PATIÑO, Harold Jhair. Modelación de la gasificación de biomasa en un reactor de lecho fijo. [En línea]. Tesis Magíster en Ingeniería - Ingeniería Mecánica. Universidad Nacional de Colombia, 2011. p. 13. [Consultado en 8 de noviembre del 2018]. Disponible en: <http://bdigital.unal.edu.co/3956/1/291499.2011.pdf>

Para esta propuesta se hará uso de un gasificador de lecho fijo en flujo paralelo, ya que esta configuración del reactor evita el arrastre de grandes cantidades de alquitrán ya que los “flujos de biomasa y agente gasificante van en la misma dirección. El aire entra en el gasificador a una cierta altura por debajo de la parte superior del reactor y va directamente a la zona de combustión. El gas producido

²²¹ GARCIA PATIÑO, Harold Jhair. Modelación de la gasificación de biomasa en un reactor de lecho fijo. [En línea]. Tesis Magíster en Ingeniería - Ingeniería Mecánica. Universidad Nacional de Colombia, 2011. p. 12. [Consultado en 8 de noviembre del 2018]. Disponible en: <http://bdigital.unal.edu.co/3956/1/291499.2011.pdf>

²²² Ibíd., p. 12.

fluye hacia abajo al igual que la biomasa y sale por la parte inferior del lecho de residuo carbonoso²²³; Por esta razón cuando el gas pasa por la zona de alta temperatura, el “residuo carbonoso se está oxidando, el alquitrán contenido en el gas producido encuentra condiciones favorables para craquearse, por esta razón, un gasificador downdraft tiene una tasa de producción alquitranes baja (0,015 - 3 g/Nm³)²²⁴, contrario a lo que sucede con la configuración en contracorriente, donde al ser la salida del gas en la parte superior del reactor este arrastra residuos de alquitrán que al pasar por la parte fría del reactor se condensan por lo que la concentración de este componente en el gas será mucho mayor en un gasificador de flujo en contracorriente que en uno de flujo cruzado o paralelo.

Por otra parte, el reactor debe ser operado según Klug²²⁵ a temperaturas cercanas a los 800°C en donde se pueden obtener rendimientos para el gas cercamos al 85% utilizando como agente gasificante aire, el cual a pesar de no ser el agente gasificante que mejores rendimientos proporcione dentro del proceso de gasificación, al ser el compuesto disponible de manera natural sería el escogido para trabajar.

4.3.1 Balance de energía. De manera similar a como se desarrolló el balance de energía para el proceso de pirólisis (ver capítulo 3), se realiza el balance correspondiente al proceso de gasificación, esta vez manejando una temperatura de 800°C, temperatura característica para este proceso, suponiendo una alimentación de 210 g como la trabajada para el proceso de pirólisis y bajo las mismas suposiciones de que el valor para la energía cinética, potencial y trabajo son iguales a 0; el balance de masa correspondiente al proceso de gasificación se puede observar en la ecuación 29.

Ecuación 29. Balance de energía para el proceso de gasificación.

E. final sistema – E. inicial sistema = E. neta transferida al sistema

$$(U_f - U_i) + (E_{cf} - E_{ci}) + (E_{pf} - E_{pi}) = Q + W$$

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

$$\Delta U = Q = m * C_{p_{madera}} * \Delta T$$

$$\Delta U = Q = 0,21 \text{ kg} * 1760 \text{ J}/(\text{kg} * ^\circ\text{C}) * (800^\circ\text{C} - 21^\circ\text{C})$$

$$\Delta U = Q = 287,91 \text{ kJ}$$

²²³ VARGAS SALGADO, Carlos A. Estudio comparativo de la utilización de las tecnologías de gasificación downdraft y lecho fluido burbujeante para la generación de energía eléctrica en aplicaciones de baja potencia, Citado por Wikipedia. Gasificación de biomasa, 2018. Párr 9. [Consultado en 2 de enero del 2019]. Disponible en: https://es.wikipedia.org/wiki/Gasificaci%C3%B3n_de_biomasa#cite_note-3.

²²⁴ *Ibíd.*, párr. 10.

²²⁵ Klug. *Op. Cit.*, p. 38.

Como podemos observar, la energía interna asociada al proceso de gasificación es mayor que la obtenida en el proceso de pirólisis en donde se obtuvieron valores de 232 kJ y 250 kJ aproximadamente a temperaturas de operación de 650°C y 700°C respectivamente en donde una vez más este valor aumenta con el aumento de la temperatura pasando de rendimientos para el gas del 57% en pirólisis a 700°C a rendimientos para el gas cercanos al 85% en un proceso de gasificación a una temperatura de operación de 800°C.

5. ESTIMACIÓN DE LOS COSTOS UNITARIOS DEL PROYECTO

Luego de definir las especificaciones técnicas para la propuesta del proceso pirolítico y la alternativa utilizando gasificación de maderas tropicales, en el presente capítulo se construye un presupuesto de inversión el cual permite tener un panorama general de los posibles costos unitarios relacionados con la implementación de las dos alternativas propuestas anteriormente con base a los resultados obtenidos durante el desarrollo de la investigación.

Dentro de la planeación del proyecto se estableció que el lugar destinado para montar los equipos será en una maloka (ver figura 19) dispuesta por la comunidad indígena, que permita proteger los equipos contra las condiciones ambientales evitando que estos queden expuestos en el exterior.

Figura 19. Maloka indígena, lugar de ubicación de los equipos.



Fuente: AMAZONATE. Turismo con indígenas en el Amazonas. 2018. [Consultado en 3 de enero del 2019]. Disponible en: <https://blog.amazonate.com/blog/turismo-con-indigenas-en-el-amazonas>

La construcción del presupuesto se dividirá en tres partes principalmente, la primera de ellas asociada a los costos de inversión correspondientes a los equipos, los cuales serán adquiridos una única vez, en segundo lugar costos asociados a la mano de obra, los cuales serán considerados costos operacionales que se tendrán de manera continua durante todo el proyecto y finalmente costos adicionales asociados a reparaciones y transporte (mantenimiento) los cuales serán costos que la empresa Aprotect S.A.S estima ocurran 2 veces al año aproximadamente.

Los costos asociados a los equipos de reacción, es decir el reactor de pirólisis y el reactor de gasificación, se estimarán respectivamente con base al costo de fabricación del reactor SemiBatch que opera actualmente en Laboratorios Calderón

y el costo de adquisición de un gasificador de lecho fijo como el implementado en el Jardín Botánico de Bogotá, de la compañía All power labs, marca Power pallet pp20 (ver figura 20) de California USA, el cual produce cerca de 15 kWh de energía.

Figura 20. Gasificador Power pallet pp20.



Fuente: ALL POWER LBS. [Sitio web]. Power pallet pp20. [Consultado en 10 de noviembre del 2018]. Disponible en: <http://www.allpowerlabs.com/products/20kw-power-pallets>

Para establecer el costo asociado al equipo de pirólisis sabiendo que la tasa de crecimiento del precio no es lineal se deben tener en cuenta una serie de parámetros para la estimación del costo del equipo a una escala mayor; estos parámetros según el doctor Calderón²²⁶ son los siguientes:

- La capacidad del reactor crece con el cubo del diámetro y el costo con el cuadrado del mismo, por lo que el valor del equipo crece a la potencia $2/3 = 0.66$.
- El valor de los controles (temperatura y presión) son aproximadamente del 25 por ciento del valor del equipo y valdrían lo mismo en un equipo n veces más grande (ver capítulo 4), para este caso se puede aproximar a que el equipo es cerca de 3 veces más grande que el original implementado durante la experimentación.
- El valor del equipo que actualmente se tiene en el laboratorio incluyendo el condensador y el reactor es de \$4.500.000
- El valor de los controladores es de \$1.500.000.

Con base en lo anterior es posible entonces afirmar que un costo aproximado del reactor de pirólisis que se implementaría podría calcularse mediante la siguiente ecuación:

²²⁶ CALDERÓN Felipe. Laboratorios Calderón. Bogotá, Colombia. Observación inédita, 2018.

Ecuación 30. Estimación del costo de fabricación del equipo de pirólisis.

$$\text{Costo} = (\text{Relación de crecimiento del equipo})^{0,66} * \text{Valor del equipo} (\$) \\ + \text{Valor de los controladores} (\$)$$

$$\text{Costo} = \left(\frac{3}{1}\right)^{0,66} * 4.500.000 + 1.500.000 = \$10.792,071$$

Por otra parte los costos asociados a la mano de obra se calculan estimando contar con un jefe de operarios encargado de supervisar la operación, programar y dirigir el mantenimiento y hacerse responsable de las reparaciones, el cual devengará un 35% más de salario que los dos operarios con los que se contaría para la operación general del proceso, para los cuales se asimilará el costo de mano de obra como el de cualquier otro oficio (tipo obrero) con salario mínimo y todas sus prestaciones de ley (Ver anexo D); además de esto se tendrán en cuenta costos extra asociados principalmente al transporte, los cuales corresponderían con el valor de un pasaje entre La Pedrera y Leticia (aerolínea Satena) más los 45 galones de gasolina a razón de \$25.000/galón²²⁷, los cuales hacen referencia al combustible requerido para realizar los traslados por tierra y embarcación adicionales al transporte aéreo para ir y volver a La Pedrera desde Centro Providencia sobre el Apaporis, por asunto de repuestos o reparaciones imposibles de realizar localmente (ver cuadros 4 y 5).

Cabe resaltar que el presupuesto a continuación corresponde a 1 año de funcionamiento más la inversión inicial para su exitosa puesta en marcha.

²²⁷ GNECCO Mauricio. Aprotex S.A.S. Villavicencio, Colombia. Observación inédita, 2018.

Cuadro 4. Presupuesto alternativa de diseño por pirólisis.

Recursos		Concepto	VALOR (\$)		Cantidad	Total (\$)
Inversión	Operación de secado	Estructura de madera (Bloques de madera*+tornillos**)	\$ 23.400		1	\$ 23.400
		Plástico tipo invernadero calibre 6 (m)***	\$ 11.500		30	\$ 345.000
		Adecuación del terreno, plancha de cemento (50 kg)	\$ 18.800		2	\$ 37.600
	Operación de reducción de tamaño	Sierra eléctrica	\$ 511.990		2	\$ 1.023.980
	Reactor Pirólisis	Reactor SemiBatch en acero inoxidable	\$ 10.792.071		1	\$ 10.792.071
	Traslado de equipos a zona indígena****	Transporte carga (Villavicencio-Leticia)	\$ 1.500.000		1	\$ 1.500.000
		Transporte carga (Leticia-La pedrera)	\$ 800.000		1	\$ 800.000
		Combustible (45 Gal) por concepto de traslado por tierra y agua	\$ 25.000		45	\$ 1.125.000
	Total					\$ 15.647.051
Mano de obra		Jefe de operarios (mes +35% Operario)	\$ 1.522.256		1	\$ 1.522.256
		Operarios (mes)	\$ 1.127.597		2	\$ 2.255.194
		Total al mes	\$ 3.777.450	Total al año	\$ 45.329.400	
Otros		Transporte (2 veces al año)	Pasaje (Aéreo)	\$ 167.700	2	\$ 335.400
			Combustible (45 Gal)	\$/Gal	2	\$ 2.250.000
			\$ 25.000			
\$ 2.585.400						
TOTAL AÑO					\$ 63.561.851	

*No se asociarán costos relacionados con la estructura de madera ya que se planea construir con el mismo recurso maderero obtenido del río.

**Tornillo ensamble para madera avellanado 12x3 por 100 unidades \$23.400

*** El plástico tipo invernadero cuenta con una garantía de 2 años y una vida útil promedio de 5 años.

**** Servicio de transporte de carga especial vía SATENA.

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 5. Presupuesto alternativa de diseño por gasificación.

Recursos		Concepto	VALOR (\$)		Cantidad	Total (\$)
Inversión	Operación de secado	Estructura de madera (Bloques de madera*+tornillos**)	\$ 23.400		1	\$ 23.400
		Plástico tipo invernadero calibre 6 (m)***	\$ 11.500		30	\$ 345.000
		Adecuación del terreno, plancha de cemento (50 kg)	\$ 18.800		2	\$ 37.600
	Operación de reducción de tamaño	Sierra eléctrica	\$ 511.990		2	\$ 1.023.980
		Astilladora de madera	\$ 2.700.000		1	\$ 2.700.000
	Reactor	Gasificador	\$ 69.600.000		1	\$ 69.600.000
	Traslado de equipos a zona indígena****	Transporte carga (Villavicencio-Leticia)	\$ 1.500.000		1	\$ 1.500.000
		Transporte carga (Leticia-La pedrera)	\$ 800.000		1	\$ 800.000
		Combustible (45 Gal) por concepto de traslado por tierra y agua	\$ 25.000		45	\$ 1.125.000
	Total					\$ 77.154.980
Mano de obra	Jefe de operarios (mes)		\$ 1.522.256		1	\$ 1.522.256
	Operarios (mes)		\$ 1.127.597		2	\$ 2.255.194
	Total al mes		\$ 3.777.450	Total al año	\$ 45.329.400	
Otros	Transporte (2 veces al año)		Pasaje (Aéreo)	\$ 167.700	2	\$ 335.400
			Combustible (45 Gal)	\$/Gal	2	\$ 2.250.000
			\$ 25.000			
Total					\$ 2.585.400	
TOTAL AÑO					\$ 125.069.780	

*No se asociarán costos relacionados con la estructura de madera ya que se planea construir con el mismo recurso maderero obtenido del río.

**Tornillo ensamble para madera avellanado 12x3 por 100 unidades \$23.400

*** El plástico tipo invernadero cuenta con una garantía de 2 años y una vida útil promedio de 5 años.

**** Servicio de transporte de carga especial vía SATENA.

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar la implementación de un proceso de conversión termoquímica de biomasa a partir de un gasificador es mucho más costoso que la implementación de un proceso de pirólisis, principalmente por los costos asociados a la reducción de tamaño de partícula, el cual debe ser más riguroso para el proceso de gasificación que para el de pirólisis, además que el gasificador es un equipo más costoso que un reactor pirolítico; por otra parte a pesar de que el proceso de gasificación es evidentemente más costoso en su implementación con base al estudio que se realizó para los dos procesos, se evidencia que los rendimientos y la calidad del gas que finalmente es el objetivo fundamental de producción para ambos procesos, es mejor en este proceso lo que permite cumplir con el requerimiento energético de 10 a 15 kWh de potencia eléctrica utilizando menor cantidad de madera que la necesaria implementando el proceso de pirólisis y por ende requerirá un menor espacio para la disposición del equipo, a diferencia del necesario para disponer el reactor pirolítico, el cual es evidentemente mucho mayor.

6. CONCLUSIONES

Del presente proyecto de investigación que busco mediante la evaluación de un proceso de pirólisis partiendo de maderas tropicales, generar una alternativa de producción de energía eléctrica a partir de los gases combustibles producidos, se puede concluir que:

- Se realizó la caracterización de las 7 muestras de madera en donde se determinó que tenían porcentajes de humedad en promedio del 50%, lo que hizo obligatorio la realización de una operación de secado que asegurara porcentajes de humedad por debajo del 12%; en relación con el contenido de cenizas, se evidencio un porcentaje de cenizas que varía entre el 1% y el 12%, conocer este valor es de suma importancia ya que indica la cantidad de materia que no reaccionara en el proceso al ser de carácter inorgánico; La muestra 1 fue la que mayor porcentaje de cenizas registro (11,67%), esto se puede explicar ya que esta muestra fue la que mayor conglomerado de tierra, rocas pequeñas y residuos forestales presentó durante el muestreo los cuales constituyen el principal componente inorgánico de la biomasa; por otra parte conocer el valor de la densidad de las muestras permitió determinar cuáles serían las muestras de madera que mejores rendimientos de gas arrojarían al ser las de mayor densidad, en donde efectivamente las muestras 1 (0,97 g/ml) y 3 (1,02 g/ml) las cuales formaron la muestra A (maderas de alta densidad, $\rho=0,994$ g/ml).
- El proceso pirolítico de las maderas se llevó a cabo en un reactor semibatch de capacidad de 4 L (1,5 kg), en donde se corroboró que a mayor densidad de la biomasa alimentada al proceso, mayor es la fracción de gas resultante, obteniendo para una densidad de 0,994 g/ml (muestra 3*) un rendimiento para el gas del 55%, y para una densidad de 0,836 g/ml (muestra 1*) un rendimiento para el gas del 45%, esto debido a que la densidad es un parámetro que influye directamente en la producción de gas, un material de alta densidad hará que los alquitranes producidos durante el proceso queden retenidos en las partículas durante más tiempo ocasionando que una fracción más alta de estos se convierta en gas; Por otra parte, el aumento en la temperatura de operación de 650°C a 700°C, mejora los rendimientos del producto gaseoso cerca de 3 puntos porcentuales, esto debido a que altas temperaturas favorecen el rompimiento de moléculas complejas dando origen a moléculas más sencillas.
- Mediante la realización de una cromatografía de gases se logra determinar que este tiene una carga importante de compuestos aromáticos como el benceno, el ciclohexadieno, la piridina, entre otros, provenientes de reacciones secundarias no deseadas muy comunes cuando se manejan reactores tipo SemiBatch, ya que al no existir un flujo de gas inerte que desplace a los productos volátiles producidos se generan reacciones secundarias no deseadas que afectan el rendimiento del proceso; Finalmente se calcula el poder calorífico del gas,

obteniendo un valor de 1,105 kWh/kg, característico para gases de pirólisis, sin embargo el estudio cromatográfico arrojó un porcentaje alto de CO₂ de cerca del 73%, esto se puede explicar mediante la forma en la que se realizó el muestreo el cual se tomó en su totalidad en la fase inicial del proceso en donde el oxígeno que empezaba a salir proveniente del reactor aumentara la composición de dióxido de carbono en la muestra gaseosa.

- El dimensionamiento del proceso de pirólisis de madera arrojó que con un gas de un poder calorífico de 1,105 kWh/kg, se requieren cerca de 67 kg de madera seca para cumplir con la demanda energética del proyecto de 10 kW, en consecuencia, se requerirá de un reactor semibarch de 1,17 m de altura y 0,44 m de diámetro para poder tratar esta cantidad de madera manteniendo las características del reactor utilizado durante la experimentación, operando a 700°C y presión atmosférica.
- Mediante una revisión bibliográfica se logró establecer que el proceso de gasificación es un alternativa que comparada con el proceso de pirólisis mejora notablemente el rendimiento y la calidad del gas al operar a altas temperaturas (~800°C) y contar con la presencia de un agente gasificante (aire), pasando de un poder calorífico cercano a 1,105 kWh/kg a 4,44 kWh/kg lo que repercutirá en la disminución significativa de la cantidad de biomasa (madera) necesaria para cumplir la misma demanda energética (10 kWh), que pasa de 67 kg aproximadamente a 11 kg, lo que implicara menor cantidad de madera a recolectar, secar y adecuar para ingresar al proceso. Por otra parte, los procesos de pre tratamiento asociados a la gasificación en especial la operación de reducción de tamaño, es mucho más rigurosa que la requerida en el proceso de pirólisis por lo que si bien en el proceso de gasificación se mejora el rendimiento y la calidad del gas del proceso, este requerirá operaciones de pretratamiento más meticulosas.
- En ambos procesos el gas sale con una cantidad importante de alquitranes que debe ser retirada o disminuida ya que estos compuestos al ingresar al motor en este caso de combustión interna pueden generar taponamientos y daños por corrosión asociados a su carácter ácido, por lo que se puede aprovechar las propiedades adsorbentes del producto sólido del proceso (biochar), como un filtro cuyo objetivo será el de reducir la carga de alquitranes presente en el gas y de esta manera evitar daños asociados a la presencia de estos compuestos.
- Finalmente, en cuanto a los costos globales para los procesos de pirólisis (\$ 63.561.851) y gasificación (\$125.069.780), se puede concluir que el proceso de pirólisis es mucho más económico de implementar que el de gasificación básicamente porque los costos asociados a la operación de reducción de tamaño de partícula y del reactor de este último son mucho más elevados que los que demanda el proceso de pirólisis, siendo el valor del kW en el proceso de pirólisis

de \$ 3.3560185 y para el de gasificación de \$12.506.978; sin embargo los costos asociados a la mano de obra (\$ 45.329.400), costos por mantenimiento (\$ 2.585.400), operación de secado (\$406.000) y el transporte de equipos a la zona (\$3.425.000), serán los mismos para las dos alternativas.

7. RECOMENDACIONES

De acuerdo con lo desarrollado en este proyecto, se genera la necesidad de trabajar en nuevos aportes para la profundización y mejora en la parte conceptual en cuanto a tecnologías limpias y procesos de conversión termoquímicos de biomasa, por esta razón a continuación, se enlistan una serie de recomendaciones cuyo objetivo es el de proponer temáticas para continuar con esta línea de investigación y obtener mejores resultados en futuros proyectos referentes a este campo.

- Realizar un muestreo insitu de los recursos madereros locales con el fin de identificar su calidad y disponibilidad, para compararlos con los reportados en la bibliografía y los analizados durante la realización del proyecto.
- Realizar las curvas de secado correspondientes al proceso de secado de madera con altos porcentajes de humedad inicial.
- Realizar un muestreo representativo del gas saliente del proceso de pirólisis con el fin de comparar los datos con los resultados obtenidos en la cromatografía de gases realizada durante la experimentación.
- Realizar el análisis elemental, de fracciones y poder calorífico de manera experimental para maderas con altos porcentajes de humedad y compararlos con los registrados teóricamente en el presente proyecto.
- Determinar la influencia del tamaño de partícula en los rendimientos de los productos de pirólisis partiendo de madera como fuente biomásica.
- Implementar el proceso de pirólisis de madera utilizando otros tipos de reactores con tecnologías más avanzadas que maximicen los rendimientos del proceso y reduzcan problemas de transferencia de calor y masa, así como la aparición de reacciones secundarias, como los reactores de lecho fluidizado o de tornillo.
- Determinar la influencia de catalizadores en los rendimientos del proceso de pirólisis de madera.
- Caracterizar el producto líquido (aceite pirolítico) del proceso, con el fin de evaluar su uso como combustible.
- Aumentar el rango de temperatura en la operación del proceso de pirólisis de madera, mayores a 700°C, con el fin de determinar la influencia de altas temperaturas en la distribución de los productos.

- Evaluar el proceso de pirólisis de madera mediante la implementación de procesos de pirólisis rápida, flash y al vacío, con el fin de determinar su influencia en la distribución y calidad de los productos sólidos, líquido y gas del proceso.
- Realizar el análisis cinético del proceso de pirólisis de madera.
- Evaluar y cuantificar el poder adsorbente del producto sólido (biochar) en la remoción de alquitranes presente en el gas.
- Evaluar de manera experimental los rendimientos del proceso de gasificación como proceso alternativo de producción de gas combustible partiendo de madera como fuente biomásica.
- Analizar la relación costo beneficio para los procesos de pirólisis y gasificación planteados en el presente proyecto para determinar así cuál de los dos resulta más rentable para los fines últimos de la puesta en marcha del proceso de conversión termoquímica de maderas tropicales para la producción de energía eléctrica.

BIBLIOGRAFÍA

ALQUITRÁN. [Anónimo]. [En línea]. [Consultado el 26 de octubre del 2018]. Disponible en: <https://www.rocasym minerales.net/alquitran/>

ALVARES RODRÍGUEZ Ana; PIZARRO GARCÍA Consuelo y FOLGUERAS DÍAZ María Belén. Caracterización química de biomasa y su relación con el poder calorífico, 2012. p. 10

ÁLVAREZ BONILLA Francisco y YASUSHI Hirai. Usos del Ácido Piroleñoso. Secretaría Ejecutiva de Planificación Sectorial Agropecuaria (SEPSA), 2009. p. 1-2

ÁLVAREZ NOVES Humberto. Secado de la madera al aire. Madrid, España. Disponible en: https://www.miteco.gob.es/ministerio/pags/biblioteca/hojas/hd_1984_19.pdf. p. 5.

ANAYA LÓPEZ Héctor; VÁSQUEZ CORREA Ángela María y RAMÍREZ ARANGO Alejandra María. Curso anatomía e identificación de maderas. Medellín, Colombia, 2011. Disponible en: <http://191.98.188.189/Fulltext/15149.pdf>

ANAYA ROA José Antonio. Química de la madera. 2016. p. 3. [Consultado en 22 de agosto del 2018]. Disponible en: <https://www.slideshare.net/joseantonioanayaroa/quimica-de-madera-polimeros>

ARENAS PARÍS Carlos Alberto. Guía OIML g – 14: medición de densidad. 2011. p. 8-9. Disponible en: <https://www.oiml.org/en/publications/other-language-translations/spanish/g014-es11.pdf>

ARGÜELLES María Fernanda. Indígenas amazónicas siguen en el olvido. En: EL ESPECTADOR. 28 de mayo - 5:48 AM.

ARROYO VINUEZA Juan Sebastián y REINA GUZMÁN Washington Salvatore. Aprovechamiento del recurso biomasa a partir de los desechos de madera para una caldera de vapor. En: INGENIUS. p. 23. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/316859930_Aprovechamiento_del_recurso_biomasa_a_partir_de_los_desechos_de_madera_para_una_caldera_de_vapor

ATENCIA, María Elena. Densidad De Maderas (kg/M3) Ordenadas Por Nombre Común. [En línea], 2003. [Consultado en 5 de Agosto de 2018]. Disponible en: https://www.inti.gob.ar/maderaymuebles/pdf/densidad_comun.pdf

ATUESTA BOADA Luis Eduardo y SIERRA VARGAS Fabio. Caracterización físico-química de pellets producidos a partir de mezclas 50/50 carbón bituminoso/madera residual. En: INFORMADOR TÉCNICO. Jun 30, vol. 79, no. 1, p. 18

BALANCES DE ENERGÍA. Procesos industriales. [Anónimo]. [En línea]. [Consultado en 30 de enero del 2019]. p. 3. Disponible en:

<http://www3.fi.mdp.edu.ar/procesosindustriales1/archivos/Balance%20de%20energia>

BÁRCENAS PAZOS Guadalupe, M., *et al.* Estufa solar de secado de madera. México: CONAFOR, p. 28. Disponible en: <http://www.conafor.gob.mx/BIBLIOTECA/secado-madera.pdf>

BASU Prabir. Biomass Gasification and Pyrolysis. Kidlington, Oxford: Elsevier, 2010. ISBN 978-0-12-374988-8

BEAUMONT, O y SCHWOB, Y. Influence of physical and chemical parameters on wood pyrolysis, 1984.

BONILLA CÁRDENAS Fabián. Horno solar para secado de madera. Tecnológico de costa rica, 2015. p. 24.

BOTTA Néstor Adolfo. Poder Calorífico. 2018. Disponible en: http://www.redproteger.com.ar/poder_calorifico.htm.

BP España. ¿Que son los biocombustibles? [0]. [Consultado el 27 de marzo, 2018]. Disponible en: https://www.bp.com/es_es/spain/medio-ambiente-y-sociedad/biocombustibles/que-son-los-biocombustibles.html

BRIGGS John and PEAT F. David. Las Siete Leyes Del Caos. Nueva York: Harper Collins Publishers, Inc, 1999. 252 p. ISBN 84-253-3334-2

BUN-CA. Manuales sobre energía renovable BIOMASA. San José, Costa Rica: 2002. Disponible en: [http://www2.congreso.gob.pe/sicr/cendocbib/con4_uibd.nsf/5EA2E564AF6F41D405257CC1005B2354/\\$FILE/Manuales_sobre_energ%C3%ADa_renovableBIOMASA.pdf](http://www2.congreso.gob.pe/sicr/cendocbib/con4_uibd.nsf/5EA2E564AF6F41D405257CC1005B2354/$FILE/Manuales_sobre_energ%C3%ADa_renovableBIOMASA.pdf). ISBN 9968-904-02-3

CALDERÓN SÁENZ Felipe. La producción de combustibles vehiculares a partir de plásticos de desecho. 2016.

CALOR ESPECÍFICO. [Anónimo]. Valvias. [Sitio web]. [Consultado en 30 de enero del 2019]. Disponible en: <http://www.valvias.com/prontuario-propiedades-materiales-calor-especifico.php>

CAREY Francis A. y GIULIANO Robert M. Química orgánica (9a. ed). México, D.F: McGraw-Hill Interamericana, 2014.

CARRASCO GARCIA Juan E. Master en Energías Renovables y Mercado Energético 2007/2008.

CASTELLS Xavier Elías y VELO Enric. La pirólisis: Tratamiento y valorización energética de residuos. Madrid: Días de Santos, 2013. 88 p.

CASTRO JIMÉNEZ Diana Catherine. Evaluación del proceso de pirólisis aplicado al material lignocelulósico residual proveniente del pino *patula* en atmósfera de dióxido de carbono. Bogotá, Colombia. Universidad libre de Colombia, 2018. Disponible en: <https://repository.unilibre.edu.co/bitstream/handle/10901/11025/TRABAJO%20DE%20GRADO%20FINAL%20DIANA%20CATHERINE%20CASTRO%20JIM%C3%89NEZ%20.pdf?sequence=1>

CHAVERRI RODRÍGUEZ Adrián y QUESADA KIMZEY Jaime F. Diseño y construcción de un reactor para pirólisis rápida de materiales residuales.

CODENSA. Tarifas de energía eléctrica (\$/kWh). Reguladas por la comisión de regulación de energía y gas (CREG). [En línea]. Enero 2019. [Consultado en 15 de enero del 2019]. Disponible en: <https://www.enel.com.co/content/dam/enel-co/espa%C3%B1ol/personas/1-17-1/2019/Tarifario-enero-2019.pdf> tarifas

COEFICIENTE DE DILATACIÓN [Anónimo]. [Consultado en 15 agosto del 2018]. Disponible en: http://www.iesdmjac.educa.aragon.es/departamentos/fq/temasweb/FQ4ESO/FQ4ESO%20Tema%206%20Energia/62_dilatacin.html

CORAL Jesús D.; DOBROSZ GÓMEZ Isabela y GÓMEZ Miguel Á. Modelamiento Matemático y Simulación de un Reactor Rotatorio Industrial para la Producción de Clinker. En: INFORMACIÓN TECNOLÓGICA. vol. 25, no. 5, p. 79-88

CURBELO Alfredo. Gasificación, Seminario internacional de uso energético sostenible de biomasa residual. [Diapositivas]. Bogotá, 2014. 50 diapositivas. [Consultado en 20 de enero del 2019]. Disponible en: <https://slideplayer.es/slide/3346857/release/woothee>

DASSAULT SYSTEMES. Coeficiente de transferencia de calor por convección. [Consultado el 2 de noviembre del 2018]. Disponible en: http://help.solidworks.com/2011/spanish/SolidWorks/cworks/LegacyHelp/Simulation/AnalysisBackground/ThermalAnalysis/Convection_Topics/Convection_Heat_Coefficient.htm

DELGADO, Jorge. Necocli, Gasificación de la biomasa leñosa. [Video]. Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=-f5NdhJ7rfE>

DIAZ MACUNA, Et al. Colparques. Yaigojé Apaporis. [Sitio web]. [Consultado el 20 de Diciembre del 2018]. Disponible en: <https://www.colparques.net/yaigoje>

DI BLASI Colomba. Modeling chemical and physical processes of wood and biomass pyrolysis. En: ELSEVIER. vol. 34, p. 47-90

DING Yanming; WANG Changjian y LU Shouxiang. Modeling the pyrolysis of wet wood using FireFOAM. En: ENERGY CONVERSION AND MANAGEMENT. Jul.vol. 98, p. 500-506

DUÑABEITA Rafael Bilbao. Aprovechamiento termoquímico de la biomasa. Zaragoza: 2009. 1-19

EMB Construcción. Madera Seca Necesaria en la Construcción. En: EMN CONSTRUCCIÓN. Disponible en: <http://www.emb.cl/construccion/articulo.mvc?xid=2465&edi=124&xit=madera-seca-necesaria-en-la-construccion>

ENERGIZA. Procesos de conversión de Biomasa en energía. [Consultado el 26 de marzo de 2018]. Disponible en: <http://www.energiza.org/index.php/biomasa-2/56-procesos-de-conversion-de-biomasa-en-energia>

ESCALANTE REBOLLEDO Ariadna, et al. Biocarbón (biochar) I: Naturaleza, historia, fabricación y uso en el suelo. En: TERRA LATINOAMERICANA. Sep 1, vol. 34, no. 3, p. 367-382

ESCOBAR PALACIO José Carlos, et al. Procesos biológicos de conversión. 2015. 128

ESCRIVANI GUEDES Raquel; ADERVAL S. Luna y RODRÍGUEZ TORRES Alexandre. Operating parameters for bio-oil production in biomass pyrolysis: A review. En: Journal of analytical and applied pyrolysis. p. 134-149

EUROSTAT, AIE y Resolución de la Secretaría de Estado de Energía, 2013. Citado por RODRIGUEZ GALBARRO, Hermenegildo. Tablas con los valores del poder calorífico de materiales y combustibles. Ingemecanica. [Sitio web] [Consultado el 12 de Octubre del 2018]. Disponible en: https://ingemecanica.com/tutoriales/poder_calorifico.html

FERNÁNDEZ GONZÁLEZ Jesus, et al. Tecnologías para el uso y transformación de biomasa energética. Mundi-Prensa ed. Madrid-España: 2015. 175 p. ISBN 978-84-8476-674-2

FONTALVO Javier; GOMEZ MIGUEL A. y CORAL Jesús D. Modelamiento y Simulación de Hornos Rotatorios para la Producción de Clinker. Manizales, Caldas, Colombia:

FONTANOR S. L. Calderas de leña. [Consultado el 3 de octubre del 2018]. Disponible en: <http://www.fontanor.com/index.php/fontaneria-y-calefaccion/10-fontacale/8-calderas-de-lena>

FROGGATT Antony y SCHNEIDER Mycle. Nuclear Power Versus Renewable Energy VA Trend Analysis. En: POINT OF VIEW. Abril. vol. 103, p. 487-490

GALINDO, Luis Miguel, et al. Ocho Tesis Sobre El Cambio Climático Y El Desarrollo Sostenible En América Latina. Santiago: Naciones Unidas, 2015. [Consultado el 5 de marzo del 2018]. p. 7. Disponible en: https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/39840/1/S1501211_es.pdf

GARCÍA Andreu César, *et al.* Prácticas de Materiales de Construcción – I.T. Obras Públicas. 2009. p. 2. Disponible en: https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/10998/3/Pr%C3%A1ctica%20N%C2%BA%203%20_Granulometria%20I_.pd

GARCIA CORTEZ Ángela Nubia. Estudio termoquímico y cinético de la pirólisis de residuos sólidos urbanos. Universidad de Alicante, 1993.

GARCÍA DEL TORO Javier R. Características climatológicas de ciudades principales y municipios turísticos. 1982. p. 20. Disponible en: <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21789/1Sitios+turisticos2.pdf/cd4106e9-d608-4c29-91cc-16bee9151ddd>

GARCÍA GARRIDO Santiago. QUE ES LA BIOMASA. [0]. 2009-. [Consultado el 27 de marzo, 2018]. Disponible en: <http://www.plantasdebiomasa.net/que-es-la-biomasa.html>

GARCIA LIMA Antonio Guilherme. Poder Calorífico. Brasil. Disponible en: <http://www.antoniolima.web.br.com/arquivos/podercalorifico.htm>

GARCIA PATIÑO Harold Jhair. Modelación de la gasificación de biomasa en un reactor de lecho fijo. Universidad Nacional de Colombia, 2011. p. 13-14. Disponible en: <http://bdigital.unal.edu.co/3956/1/291499.2011.pdf>

GARCIA RUIZ José Manuel. Estudio y construcción de una instalación de secado de madera mediante energía solar térmica. Universidad Carlos III de Madrid, p. 32. Disponible en: <https://core.ac.uk/download/pdf/30045364.pdf>

GARRIDO SZEGEDI Pablo Javier. Diseño e implementación de un reactor continuo para la degradación química de polímeros. Universidad de Chile, 2013. p. 24-34.

GIL Chon. Medidor de humedad y temperatura VA 8040, manual del usuario. México: CEU Ediciones, 2018. Disponible en: <http://www.greentechmexico.com/files/Medidor-de-humedad-y-temperatura-VA-8040.pdf>.

GIRALDO RIVERA Oscar Darío. Conversión de biomasa recalcitrante originada en la producción de etanol a partir de la planta de banano y su fruto en combustibles mediante procesos de pirólisis. Medellín, Colombia.: Universidad Nacional de Colombia, 2012. p. 52-53. Disponible en: <http://bdigital.unal.edu.co/8324/1/15355687.2012.pdf>

GÓMEZ Alexander; KLOSE Wolfgang y RINCÓN Sonia. Pirólisis de Biomasa. Cuesco de palma de aceite. Kassel Alemania: 2008. 1 p. ISBN 978-3-89958-457-8

GOMEZ Elkin A.; RIOS Luis A. y PENA Juan D. Efecto del pretratamiento de biomasa maderera en el rendimiento a etanol. En: INFORMACION TECNOLOGICA. Oct 1, vol. 24, no. 5, p. 113

GOODFELLOW. Acero inoxidable. Disponible en: <http://www.goodfellow.com/S/Acero-Inoxidable-AISI-304.html>

GREENPOWER. PIRÓLISIS de la MADERA (destilación seca de la madera). [Sitio web]. [Consultado el 28 de Diciembre del 2018]. Disponible en: <http://carboneros.org/clients/articles/woodpyrolysis/esp/>

GRIECO Enrico y BALDI Giancarlo. Analysis and modelling of wood pyrolysis. En: CHEMICAL ENGINEERING SCIENCE. Vol. 66, no. 4, p. 650-660

GUERRA REYES Yanet y RAMOS ROBAINA BORIS, A. Procesos de pirólisis y gasificación de los residuos sólidos de tomate, 2008. Disponible en: <https://www.monografias.com/trabajos66/residuos-solidos-tomate/residuos-solidos-tomate2.shtml>

GUEVARA GARCIA Christopher Gabriel y PABLO ESPINOSA Manuel Alejandro. Diseño de un Reactor de Pirólisis Experimental para pruebas de biomasa agroforestal. Guayaquil – Ecuador: Escuela superior politécnica del litoral, 2016. p. 11. Disponible en: <http://www.dspace.espol.edu.ec/xmlui/bitstream/handle/123456789/36933/DCD88354.pdf?sequence=-1&isAllowed=y>

HELVETAS Swiss Intercooperation and Right Resources. Territorio Indigna y Gobernanza. Disponible en: http://www.territorioindigenaygobernanza.com/col_14.html

HERNÁNDEZ SAMPIERI Roberto; FERNÁNDEZ COLLADO Carlos y BAPTISTA LUCIO María del Pilar. Metodología de la investigación. 5ta ed. México, D.F: McGraw-Hill, 2010. ISBN 978-607-15-0291-9

ICONTEC. Norma técnica NTC colombiana 2518. Colombia, 1999.

IDAE. Biomasa: Gasificación. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía ed. Madrid: 2007. 6 p. ISBN 978-84-96680-20-3. Disponible en: http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_10737_Biomasa_Gasificacion_A2007_596f03d5.pdf

IDEAM. [Sitio web]. Bogotá, Atlas Climatológico de Colombia. Disponible en: <http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/atlas>.

ILLICH, van. Energía y equidad. París, Francia: Biblioteca CF+S, 1973.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Compendio de normas para trabajos escritos NTC-1486-6166. Bogotá D.C.: El instituto, 2018. ISBN 9789588585673 153 p.

INSTITUTO NACIONAL DE SEGURIDAD E HIGIENE EN EL TRABAJO. Poder calorífico (q) de diversas sustancias. Ministerio del trabajo y asuntos sociales. Disponible en:

http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Normativa/TextosLegales/RD/2004/2267_04/Ficheros/tabla1_4.pdf

INTERNACIONAL ISO 565 (TLB2):1983. EQUIVALENCIA INTERNACIONAL DE TAMICES.

IRENA .Agencia Internacional de Energías renovables. Estatuto de la Agencia Intencional de Energías Renovables (IRENA). 2010.

J. Rath, *et al.* Heat of wood Pyrolysis. ISBN 0016-2361.

JESÚS Antonio. Pirólisis. [Consultado el Mar 26,2018]. Disponible en: <http://www.ingenieriaquimica.net/articulos/361-pirolisis>

KEIKA VENTURES. Bolsas Tedlar. [Consultado el 2 de octubre de2018]. Disponible en: http://www.keikaventures.com/s_tedlar_esp.php

KLUG Michael. Pirólisis, un proceso para *derretir* la biomasa. En: REVISTA DE QUÍMICA PUCP. vol. 26, nº 1-2, p. 37-40. Disponible en: <http://revistas.pucp.edu.pe/index.php/quimica/article/viewFile/5547/5543>.

LA COSMOPOLITANA. [Consultado el 25 de octubre del 2018]. Disponible en: <http://www.lacosmopolitana.com/es/>

LIENQUENO C. María Elena. Caracterización de la biomasa. Chile: 2010. ISBN 0210-2633.

LIMA ROJAS Lizzete. Evaluación de la composición química y propiedades físicas de madera y corteza de cuatro coníferas para la producción de bioenergía. Linares, Nuevo León: Universidad autónoma de Nuevo León, 2013. p. 3.

LÓPEZ CAMACHO René y CÁRDENAS LÓPEZ Dairón. Manual de identificación de especies maderables objeto de comercio en la Amazonia colombiana. Bogotá, D.C: 2002.

LÓPEZ CAMACHO René, *et al.* Manual de identificación de especies no maderables del corregimiento de Tarapacá, Colombia. Bogotá, D.C., Colombia: 2006. 120 ISBN 9589-795072.

MAQUINOVA. Molino de martillos. [Consultado el 17 de octubre del2018]. Disponible en: <https://www.mezcladorasymolinos.com.mx/productos/molinos/de-martillos/>

MÁRQUEZ MONTESINO Francisco. Transformación térmica de la madera. [Sitio web]. [Consultado en 29 de diciembre del 2018]. Disponible en: <https://www.monografias.com/trabajos15/transformacion-madera/transformacion-madera.shtml>

MARTINEZ I. Convección Térmica Y Másica. [En línea]. En: ATERMODINÁMICA BÁSICA Y APLICADA. p. 272. [Consultado en 12 de enero del 2018]. Disponible en: <http://webserver.dmt.upm.es/~isidoro/bk3/c12/Conveccion%20termica%20y%20masica.pdf>

MEDINA BENINI Sandra; CASEMIRO DA SILVA Allan León y SEOLIN DIAZ Leonice. Fórum Ambiental: Uma visão multidisciplinar da questão ambiental. 2015. p. 336

METRING C.A. Emisividad. [En línea]. [Consultado en 2 de Noviembre del 2011]. Disponible en: [http://www.metring.com/notes/HI-10-70-MT2009%20\(1\).pdf](http://www.metring.com/notes/HI-10-70-MT2009%20(1).pdf)

MINISTERIO DE AMBIENTE. Parque Nacional Natural Yaigojé Apaporis. [Consultado el 11 de Julio de 2018]. Disponible en: <http://www.parquesnacionales.gov.co/portal/es/parques-nacionales/parque-nacional-natural-yaigoje-apaporis/>

MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Resolución 1312 de 2016. Colombia.

MONTOYA ARBELÁEZ Jorge Iván. Pirólisis rápida de biomasa. Medellín, Colombia: 2014. 24 p. ISBN 978-958-761-774-0

MORIARTY Patrick y HONNERY Damon. Can renewable energy power the future? En: ENERGY POLICY. Junio.vol. 93, p. 3-7

MORRIS CARREÑO José Ricardo. Secado de la madera. Bogotá, Colombia: 2008. 12-15. Disponible en: <http://asomavalle.org/wp-content/uploads/2011/06/Secado-Cali-Feb-2008.pdf>

MÜLLER Niels, *et al.* Pirólisis rápida de biomasa. Chile: 2013. 482 p.

NOGUES Fernando Sebastián; GARCÍA GALINDO Daniel y REZEAU Adeline. Energía de la Biomasa. 1era ed. Zaragoza, España: Universidad de Zaragoza, 2010. 47 p. ISBN 978-84-92774-91-3

OBANDO Gabriel Andrés. Condiciones de diseño de un Reactor de Pirólisis a escala de laboratorio para la obtención de biocarbón a partir de residuos orgánicos sólidos (ROS). Universidad de Manizales, 2015.

OLMO PRIETO Manuel. Efectos del biochar sobre el suelo, las características de la raíz y la producción vegetal. Universidad de Córdoba, 2016. p. 35-36. Disponible en: <https://helvia.uco.es/xmlui/bitstream/handle/10396/13381/2016000001398.pdf?sequence=1>

ORGANIZACIÓN INTERNACIONAL DE MADERAS TROPICALES. Cadenas Forestales en Colombia. [En línea]. [Consultado el 3 de septiembre del 2018]. Disponible en: http://maderas.ut.edu.co/transformacion/pagina_tra_especie.php

ORIO HERNANDEZ Alberto. Introducción a los tratamientos térmicos de residuos. 2015. Disponible en: <https://es.slideshare.net/RedesExpertos/01-introduccion-tratamientos-trmico-pir-gasinc-46938767>

OZORES BELMONTE Marta Isabel. Cromatografía de gases. Valladolid: 2016.

PARK Won Chan; ATREYA Arvind y BAUM Howard R. Experimental and theoretical investigation of heat and mass transfer processes during wood pyrolysis. En: COMBUSTION AND FLAME. vol. 157, no. 3, p. 481-494

PARQUES NACIONALES NATURALES DE COLOMBIA. [Sitio web]. Parque Nacional Natural Yaigojé Apaporis. Ministerio de ambiente. [Consultado el 11 de Julio de 2018]. Disponible en: <http://www.parquesnacionales.gov.co/portal/es/parques-nacionales/parque-nacional-naturalyaigoje-apaporis/>

PAZ FONG Francisco José. Determinación de la composición química de la madera obtenida del primer clareo en árboles de melina (*gmelina arborea roxb.*), de una plantación proveniente del departamento de izabal. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala, 2008.

PRESA Juan Manuel. Artículos de divulgación técnica sobre acabado, cuidado y protección de la madera. En: CEDRIA. Abril, vol. No 1, p. 4. Disponible en: <http://blog.cedria.es/wp-content/uploads/2015/04/ALBURA-N1-ESTRUCTURA-COMPOSICION-Y-CLASIFICACION-DE-LA-MADERA.pdf>

PRINSEN Pepijn. Composición química de diversos materiales lignocelulósicos de interés industrial y análisis estructural de sus ligninas. Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología de Sevilla. CSIC | Universidad de Sevilla, 2010. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10261/66265>

QING Liu, et al. Pyrolysis of different wood species: Impacts of C/H ratio in feedstock on distribution of pyrolysis products. En: ELSEVIER. p. 28-39. Disponible en: <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0961953418302873?token=0A4E18E93E30A3A34CF4BBF2B82C8B0B219F2EE1621DFD60E3F969603F3311D773E964F9F4ACFD6763F35DD757D186D4>

QUIMINET. Características de los molinos de bola. [En línea]. [Consultado el 17 de octubre del 2018]. Disponible en: <https://www.quiminet.com/articulos/caracteristicas-de-los-molinos-de-bola-56234.htm>

QUINTANA Rafael. Poder Calorífico de las sustancias más comunes. 2011. Disponible en: <https://cadascu.wordpress.com/2011/05/25/poder-calorifico-de-las-sustancias-mas-comunes/>

RAMÍREZ Fausto. Autonomía energética. [En línea]. [Consultado el 27 de marzo del 2018]. Disponible en: <https://www.renovablesverdes.com/autonomia-energetica-el-almacenamiento-individual-de-energia/>

RAMÍREZ Juan Carlos. Amazonia, posible y sostenible.

RAMÍREZ MARÍN Iván. Operaciones con sólidos, Serie Tyler. p. 20

RICO Javier. Veinte artículos para conocer qué se hace en todo el mundo sobre pirólisis de la biomasa. [En línea]. [Consultado el 6 de septiembre del 2018]. Disponible en: <https://www.energias-renovables.com/biomasa/veinte-articulos-para-conocer-que-se-hace-20170116>

RODRIGUEZ GALBARRO Hermenegildo. Tablas con los valores del poder calorífico de materiales y combustibles. [En línea]. [Consultado el 16 de octubre del 2018]. Disponible en: https://ingemecanica.com/tutoriales/poder_calorifico.html

RODRÍGUEZ MACHÍN Lizet, et al. Termo-conversión de biomasa por pirólisis. Tendencias de investigación y desarrollo. En: CENTRO AZÚCAR. Marzo, vol. 39, p. 1-6

ROMO ORTEGA Natalia, et al. Evaluación de las propiedades fisicoquímicas y térmicas de tallos de café y su análisis económico para la producción de pellets como biocombustible sólido. En: Eidenar. Disponible en: <http://revistaeidenar.univalle.edu.co/revista/ejemplares/10/h.htm>

SALAS GARITA Cynthia; MOYA ROQUE Roger y CORDOBA FOGLIA Rafael. Diseño y construcción de un secador solar para madera. Costa Rica: Editorial Tecnológica de Costa Rica, 2012. 2-3

SALUD SIN DAÑO – América Latina. Pirólisis, una técnica de tratamiento térmico no tradicional. Buenos Aires, Argentina. Disponible en: <https://saludsindanio.org/sites/default/files/documents-files/1463/Pirolisis.pdf>

SCHUMACHER, E. F. Lo pequeño es hermoso. 1era ed. Madrid, España: Turser/Hermann Blume, 1990. 265 p. ISBN 84-89840-27-x

SCOTT, D.S y PISKORS, J. The flash pyrolysis of aspen-poplar wood, 1984.

SIERRA Juan. Green Tech Instruments. [En línea]. [Consultado el 6 de agosto del 2018]. Disponible en: <http://greentechmexico.com/-quienes-somos-.html>

SILVA LORA Electo Eduardo y RINCON MARTINEZ José María. Bioenergía Fuentes, conversión y sustentabilidad. 1era ed. Bogotá, Colombia: Red Iberoamericana de Aprovechamiento de Residuos Orgánicos en Producción de Energía., 2014. 332 p. ISBN 978-958-58880-0-5

SMITH Robin. Chemical Process Design and Integration. New ed. ed. New York: John Wiley & Sons Inc, 2016.

SOLLA GULLÓN F.; RODRÍGUEZ SOALLEIRO R. y MERINO A. Evaluación del aporte de cenizas de madera como fertilizante de un suelo ácido mediante un ensayo en laboratorio. En: INVEST. AGR.: PROD. PROT. VEG. vol. 16, p. 380. Disponible en: http://www.inia.es/GCONTREC/pub/solla_1161156613093.pdf

SOTO Nancy; MACHADO Wilson y LÓPEZ Diana. Determinación de los parámetros cinéticos en la pirólisis del pino ciprés. En: QUÍMICA NOVA. vol. 33, no. 7, p. 1500-1505

TAMAYO José y GARCÍA Lizardo. COGENERACIÓN. [En línea]. [Consultado el 27 de marzo del 2018]. Disponible en: <http://www.energia.gob.ec/cooperacion/>

TAO Kan; STREZOV Vladimir y EVANS Tim J. Lignocellulosic biomass pyrolysis: A review of product properties and effects of pyrolysis parameters. En: RENEWABLE & SUSTAINABLE ENERGY REVIEWS. p. 1126–1140

UNIDAD DE PLANEACION MINERO ENERGÉTICA (UPME). Potencialidades de los cultivos energéticos y residuos agrícolas en Colombia. [En línea]. Bogotá D.C, Colombia: 2003. Universidad tecnológica de ciudad de Juárez. Energías Renovables. [Consultado el 05 de marzo del 2018]. Disponible en: <https://www.utcj.edu.mx/Paginas/Carreras/Ingenieria-en-Energias-Renovables.aspx>

VALTER FRANCESCATO Eliseo Antonini y BERGOMI Luca Zuccoli. Manual de combustibles de madera. AVEBIOM Asociación Española de Valorización Energética de la Biomasa ed. España: 2008. 26 p.

VARGAS SALGADO, Carlos A. Estudio comparativo de la utilización de las tecnologías de gasificación downdraft y lecho fluido burbujeante para la generación de energía eléctrica en aplicaciones de baja potencia. UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA, 2012. p. 21.

VIDA DE HOY. Colombia ratifica el Acuerdo de París sobre cambio climático. 16 de junio del 2018, 10:53 p.m.

VIGNOTE PEÑA Santiago. Procesos termoquímicos de la madera y en general de la biomasa. Madrid, 2016.

VISCARRA Silveiro. Guía práctica para el secado de madera en hornos. Santa Cruz, Bolivia: 1998.

WWF y AGUDELO DELGADO Mario Andrés. Maderas de Colombia. Colombia: 2013.

ANEXOS

**ANEXO A.
MUESTREO Y CARACTERIZACIÓN DE MADERA**

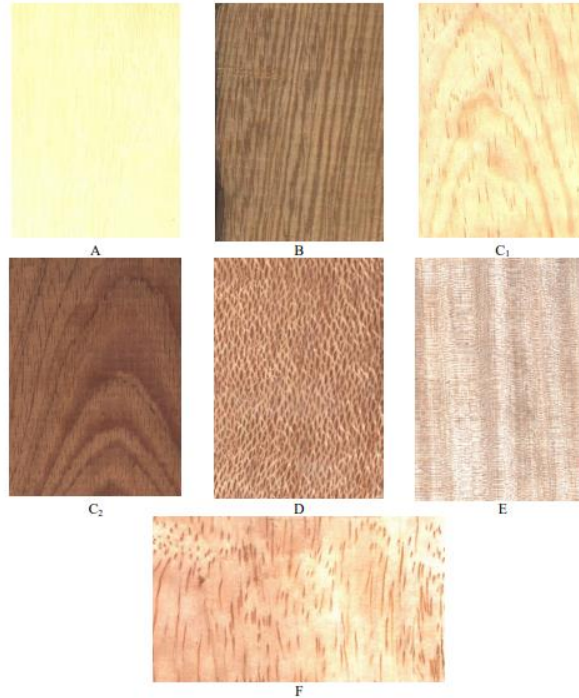
Muestreo



Fuente: Elaboración propia.

Características organolépticas

- Veteado: Diferentes tipos de veteado en la madera: (A) no acentuado, (B) en bandas paralelas, (C1 y C2) arcos superpuestos, (D) jaspeado, (E) satinado, (F) líneas vasculares.



Fuente: Anaya Lopez Hector; VÁSQUEZ CORREA ÁNGELA MARÍA y RAMÍREZ ARANGO ALEJANDRA MARÍA. Curso Anatomía E Identificación De Maderas. Medellín, Colombia: 2011. Pág. 14.

- Textura

Textura	Descripción
Gruesa	Cuando la madera posee elementos constitutivos grandes, poros visibles a simple vista; parénquima abundante y visible a simple vista; radios anchos; tejido fibroso escaso.
Media	Elementos constitutivos medianos, poros difícilmente observables a simple vista; parénquima visible ó invisible a simple vista; radios medios y abundancia regular del tejido fibroso.
Fina	Elementos constitutivos pequeños y distribuidos en forma difusa, poros no observables a simple vista; parénquima invisible a simple vista o escaso; radios finos y abundante tejido fibroso. Da como resultado una superficie homogénea y uniforme.

Fuente: Anaya Lopez Hector; VÁSQUEZ CORREA ÁNGELA MARÍA y RAMÍREZ ARANGO ALEJANDRA MARÍA. Curso Anatomía E Identificación De Maderas. Medellín, Colombia: 2011. Pág. 11-12.

- Color



Fuente: Anaya Lopez Hector; VÁSQUEZ CORREA ÁNGELA MARÍA y RAMÍREZ ARANGO ALEJANDRA MARÍA. Curso Anatomía E Identificación De Maderas. Medellín, Colombia: 2011. Pág. 10.

- Color marrón claro
- Color marrón rosáceo oscuro
- Color rosado claro
- Color marrón rosáceo
- Color marrón negruzco
- Color café claro
- Color café oscuro
- Color café rojizo
- Color café verdoso
- Color café amarilloso
- Color marrón rojizo
- Color gris rosáceo
- Color amarillo pálido
- Color blanco hueso
- Color blanco rosáceo
- Color amarillo dorado
- Color marrón dorado
- Color amarillo rojizo
- Color anaranjado claro
- Color crema grisáceo
- Color amarillo pálido

- Olor

- no distintivos
- olor agradable
- olor característico agradable
- olor desagradable

Muestras de madera.



Fuente: Elaboración propia.

Humedad

Muestra	Mediciones de humedad (%)				% de Humedad inicial
	Corteza	Corteza	Centro	Centro	
1	40,0	40,5	62,4	58,7	50,4
2	54,0	58,9	66,0	61,0	59,98
3	47,0	46,5	51,1	50,5	48,8
4	61,0	63,0	51,0	44,7	54,9
5	57,1	58,2	53,8	52,0	55,3
6	66,5	65,2	60,8	65,6	64,5
7	11,8	13,6	58,3	30,0	28,4

Fuente: Elaboración propia.

Medidor de humedad



Fuente: Elaboración propia.

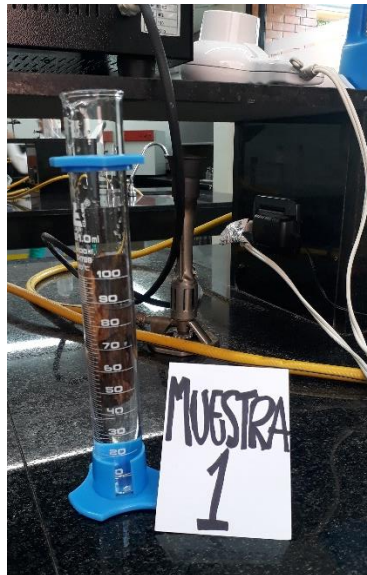
Especificaciones del equipo (Medidor de humedad VA8040)

- Rango de medición: Humedad: 0.0%~95.7%; Temperatura: -10°C~50°C
- Precisión: Medición de conductividad: $\pm 2\%$; Temperatura: $\pm 1^\circ\text{C}$
- Resolución: Humedad: 0.1%; Temperatura: 0.1°C (0.1°F)
- Tiempo de respuesta: Humedad: 1 s; Temperatura: 125 ms
- Clase de protección: IP 20
- Pantalla digital: 3 dígitos
- Diseñados de acuerdo con la directiva CE: 2004/108/CE
- Fuente de alimentación: 3 baterías 1.5V DC AAA

Densidad

Muestra	Densidad (g/ml)	
	Masa (g)	Volumen desplazado (ml)
1	15,63	16
2	7,37	8
3	8,22	8
4	4,90	5.5
5	10,68	12
6	6.75	8
7	10,00	12

Fuente: Elaboración propia.



Fuente: Elaboración propia.

Cenizas

Muestra	Masa (g)	Masa (g) [Después de mufla]
1	2,0800	0,2428
2	2,0000	0,1487
3	2,0000	0,0207
4	2,0300	0,0657
5	2,0700	0,0888
6	2,0000	0,0371
7	2,0300	0,0277

Fuente: Elaboración propia.



Fuente: Elaboración propia.

Granulometría

Tamizado muestra 1. Masa=100 g.

N° tamiz	Malla (Tyler)	Abertura (mm)	Masa retenida(g)	Xi	Xia	Dpi	Xi/Dpi
0	7	2,803	-	-	-	-	-
1	8	2,357	3,21	0,033	0,033	2,58	0,085
2	12	1,402	8,13	0,084	0,117	1,879	0,158
3	24	0,701	35,54	0,367	0,484	1,051	0,386
4	28	0,589	9,52	0,098	0,583	0,645	0,063
5	35	0,417	18,51	0,191	0,774	0,503	0,096
FONDOS	42	0,35	21,81	0,225	1	0,383	0,086
Sumatoria			96,73				0,876

Masa perdida= 3,2678 g

Fuente: Elaboración propia.

Tamizado muestra 2. Masa=75 g.

N° tamiz	Malla (Tyler)	Abertura (mm)	Masa retenida(g)	Xi	Xia	Dpi	Xi*Dpi
0	7	2,803	-	-	-	-	-
1	8	2,357	0,333	0,004	0,004	2,580	0,011
2	12	1,402	1,087	0,014	0,019	1,879	0,028
3	24	0,701	12,573	0,172	0,192	1,051	0,181
4	28	0,589	7,145	0,098	0,290	0,645	0,063
5	35	0,417	14,331	0,197	0,487	0,503	0,099
FONDOS	42	0,35	37,248	0,512	1	0,383	0,196
Sumatoria			72,719				0,580

Masa perdida= 2,2808 g

Fuente: Elaboración propia.

Tamizado muestra 3. Masa=100 g.

N° tamiz	Malla (Tyler)	Abertura (mm)	Masa retenida(g)	Xi	Xia	Dpi	Xi*Dpi
0	7	2,803	-	-	-	-	-
1	8	2,357	0,751	0,007	0,007	2,580	0,019
2	12	1,402	1,218	0,012	0,020	1,879	0,023
3	24	0,701	26,110	0,268	0,288	1,051	0,282
4	28	0,589	11,501	0,118	0,407	0,645	0,076
5	35	0,417	25,170	0,259	0,666	0,503	0,130
FONDOS	42	0,35	32,433	0,333	1	0,383	0,127
Sumatoria			97,184				0,660

Masa perdida= 2,8154 g

Fuente: Elaboración propia.

Tamizado muestra 4. Masa=100 g.

N° tamiz	Malla (Tyler)	Abertura (mm)	Masa retenida(g)	Xi	Xia	Dpi	Xi*Dpi
0	7	2,803	-	-	-	-	-
1	8	2,357	0,240	0,002	0,002	2,580	0,006
2	12	1,402	3,282	0,033	0,036	1,879	0,063
3	24	0,701	33,593	0,345	0,381	1,051	0,363
4	28	0,589	14,710	0,151	0,532	0,645	0,097
5	35	0,417	17,322	0,178	0,710	0,503	0,089
FONDOS	42	0,35	28,121	0,289	1	0,383	0,110
Sumatoria			97,271				0,730

Masa perdida= 2,7290 g

Fuente: Elaboración propia.

Tamizado muestra 5. Masa=100 g.

N° tamiz	Malla (Tyler)	Abertura (mm)	Masa retenida(g)	Xi	Xia	Dpi	Xi*Dpi
0	7	2,803	-	-	-	-	-
1	8	2,357	0,139	0,001	0,001	2,580	0,003
2	12	1,402	0,281	0,002	0,004	1,879	0,005
3	24	0,701	5,474	0,055	0,060	1,051	0,058
4	28	0,589	3,945	0,040	0,100	0,645	0,025
5	35	0,417	18,336	0,187	0,287	0,503	0,094
FONDOS	42	0,35	69,80	0,712	1	0,383	0,273
Sumatoria			97,977				0,461

Masa perdida= 2,0222 g

Fuente: Elaboración propia.

Tamizado muestra 6. Masa=100 g.

N° tamiz	Malla (Tyler)	Abertura (mm)	Masa retenida(g)	Xi	Xia	Dpi	Xi*Dpi
0	7	2,803	-	-	-	-	-
1	8	2,357	0,032	0,0003	0,0003	2,580	0,0008
2	12	1,402	0,280	0,002	0,003	1,879	0,005
3	24	0,701	18,308	0,187	0,190	1,051	0,196
4	28	0,589	7,786	0,079	0,269	0,645	0,051
5	35	0,417	16,587	0,169	0,439	0,503	0,085
FONDOS	42	0,35	54,9	0,560	1	0,383	0,215
Sumatoria			97,896				0,554

Masa perdida= 2,1039 g

Fuente: Elaboración propia.

Tamizado muestra 7. Masa=100 g.

N° tamiz	Malla (Tyler)	Abertura (mm)	Masa retenida(g)	Xi	Xia	Dpi	Xi*Dpi
0	7	2,803	-	-	-	-	-
1	8	2,357	0,310	0,003	0,003	2,580	0,008
2	12	1,402	1,791	0,018	0,021	1,879	0,034
3	24	0,701	36,107	0,367	0,388	1,051	0,386
4	28	0,589	9,284	0,094	0,483	0,645	0,060
5	35	0,417	18,923	0,192	0,675	0,503	0,096
FONDOS	42	0,35	31,901	0,324	1	0,383	0,124
Sumatoria			98,318				0,710

Masa perdida= 1,6815 g

Fuente: Elaboración propia.

Serie Tyler

	Mallas	Abertura Efectiva, in	Abertura efectiva, mm
N		1,050	26,670
Ψ		0,883	22,427
N		0,742	18,859
Ψ		0,624	15,858
N		0,525	13,335
Ψ		0,441	11,213
N		0,371	9,429
Ψ	2,5	0,312	7,929
N	3	0,263	6,668
Ψ	3,5	0,221	5,607
N	4	0,186	4,715
Ψ	5	0,156	3,965
N	6	0,131	3,334
Ψ	7	0,110	2,803
N	8	0,093	2,357
Ψ	9	0,078	1,982
N	10	0,066	1,667
Ψ	12	0,055	1,402
N	14	0,046	1,179

	Mallas	Abertura Efectiva, in	Abertura efectiva, mm
Ψ	16	0,0390	0,991
N	20	0,0328	0,833
Ψ	24	0,0276	0,701
N	28	0,0232	0,589
Ψ	32	0,0195	0,496
N	35	0,0164	0,417
Ψ	42	0,0138	0,350
N	48	0,0116	0,295
Ψ	60	0,0098	0,248
N	65	0,0082	0,208
Ψ	80	0,0069	0,175
N	100	0,0058	0,147
Ψ	115	0,0049	0,124
N	150	0,0041	0,104
Ψ	170	0,0034	0,088
N	200	0,0029	0,074
Ψ	235	0,0024	0,062
N	270	0,0021	0,052
N	325	0,0017	0,044

Equivalencia Internacional de Tamices



EQUIVALENCIA INTERNACIONAL DE TAMICES

INTERNACIONAL ISO 565 (TLB2):1983	EE.UU. ASTM E 11-87	TYLER Standard screen 1910	BRITANICO BS 410: 1986
Apertura Nomina milímetros/micrones	Equivalente Malla N°	Equivalente Malla N°	Equivalente Malla N°
8,00	-	2 1/2	-
6,70	-	3	-
6,30	3	-	-
5,60	3 1/2	3 1/2	3
4,75	4	4	3 1/2
4,00	5	5	4
3,35	6	6	5
2,80	7	7	6
2,36	8	8	7
2,00	10	9	8
1,70	12	10	10
1,40	14	12	12
1,18	16	14	14
1,00	18	16	16
850 µm	20	20	18
710	25	24	22
600	30	28	25
500	35	32	30
425	40	35	36
355	45	42	44
300	50	48	52
250	60	60	60
212	70	65	72
180	80	80	85
150	100	100	100
125	120	115	120
106	140	150	150
90	170	170	170

INTERNACIONAL ISO 565 (TLB2):1983	EE.UU. ASTM E 11-87	TYLER Standard screen 1910	BRITANICO BS 410: 1986
Apertura Nomina milímetros/micrones	Equivalente Malla N°	Equivalente Malla N°	Equivalente Malla N°
75	200	200	200
63	230	250	240
53	270	270	300
45	325	325	350
38	400	400	400
32	450	-	440
25	500	-	-
20	635	-	-

www.sabo.es - P.E. Abra Industrial Parcela 2.2.1 - 48500 Abanto y Ciervana
 Telf.: (+34) 94 411 21 21 - Fax: (+34) 94 412 10 22
 E-mail: javier.irtzar@sabo.es

Fuente: INTERNACIONAL ISO 565 (TLB2):1983. Equivalencia Internacional De Tamices.

**ANEXO B.
PROCESO DE PIRÓLISIS DE MADERA**

Pre- tratamiento de biomasa

Secado

Progresión de secado al aire.

Muestra 1		Muestra 2		Muestra 3	
Tiempo (Días)	%Humedad	Tiempo (Días)	%Humedad	Tiempo (Días)	%Humedad
0	50,4	0	59,9	0	48,8
1	49	1	57,3	1	48
2	48,6	2	54,8	2	47,1
3	47,9	3	53,1	3	45,9
4	45,7	4	52	4	44,7
5	44,8	5	50,6	5	43,4
6	43,9	6	49,5	6	42,3
7	43,4	7	48,9	7	41,4

Muestra 4		Muestra 5		Muestra 6	
Tiempo (Días)	%Humedad	Tiempo (Días)	%Humedad	Tiempo (Días)	%Humedad
0	54,9	0	55,3	0	64,5
1	54,2	1	54,8	1	63,2
2	53,5	2	54,1	2	62,4
3	52,8	3	53,2	3	60,8
4	51,5	4	51,8	4	58,7
5	50,1	5	49,7	5	56,6
6	48,3	6	48,2	6	55,8
7	46,6	7	46,8	7	54,2

Muestra 7	
Tiempo (Días)	%Humedad
0	28,4
1	28,2
2	28
3	27,8
4	27,4
5	26,9
6	26,6
7	26,4

Fuente: Elaboración propia.

Horno de secado



Fuente: Elaboración propia.

Progresión de secado en horno.

Muestra 1		Muestra 2		Muestra 3	
Tiempo (Horas)	%Humedad	Tiempo (Horas)	%Humedad	Tiempo (Horas)	%Humedad
0	43,4	0	48,9	0	41,4
6	25,6	6	26,8	6	19,2
12	18,4	12	17,5	12	13,4
18	14,8	18	12,4	18	10,8
24	11	24	9,2	24	9

Muestra 4		Muestra 5		Muestra 6	
Tiempo (Horas)	%Humedad	Tiempo (Horas)	%Humedad	Tiempo (Horas)	%Humedad
0	46,6	0	46,8	0	54,2
6	25,8	6	22,5	6	27,8
12	19,5	12	16,4	12	16,7
18	12,4	18	10,6	18	12,6
24	10	24	9	24	9,3

Muestra 7

Tiempo (Horas)	%Humedad
0	26,4
6	14,9
12	12,8
18	11,2
24	NA

Fuente: Elaboración propia.

Características del horno



Figura 2: Placa de características del equipo (ejemplo E 28 equipamiento estándar)

Indicaciones en la placa de características		Información
BINDER		Fabricante: BINDER GmbH
E 28		Modelo E 28
Serial No.	00-00000	Nº de serie 00-00000
Nominal temperature	230 °C 446 °F	Temperatura nominal
Enclosure protection	IP 20	IP Tipo de protección 20 según EN 60529
Temp. safety device	DIN 12880	Protección por sobretemperatura según la norma DIN 12880
Class		Dispositivo de seguridad – sobretemperatura
Art. No.	9010-0001	Artículo nº 9010-0001
Project No.	---	(Fabricación especial según proyecto N°)
0,80 kW		Potencia nominal 0,80 kW
230 V 1 N ~		Voltaje nominal 230 V ± 10%, aparato monofásico
3,5 A		Corriente nominal 3,5 A
50/60 Hz		Frecuencia de red 50/60 Hz

Símbolo en la placa de características	Información
	Distintivo de conformidad CE
	Aparatos eléctricos y electrónicos y que se utiliza en la UE desde el 13 de agosto de 2005 y se debe reciclar aparte conforme a la Directiva de la UE 2002/96/EG sobre residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE).
	El aparato ha sido validado por el sistema de certificación GOST R de GOSTSTANDARD Rusia

Fuente: BINDER. Manual de funcionamiento. Horno Binder E28, 2013. [Consultado en 1 de octubre del 2018]. Disponible en: file:///C:/Users/USUARIO/Desktop/342934264-Estufa-Binder-E-28-B-E-06-2013-sp-pdf.pdf

Molino de martillo (proceso de reducción de tamaño de partícula)



Fuente: Elaboración propia.

Muestras después de molienda.



Fuente: Elaboración propia.

Muestras agrupadas por densidad (A, B y C)



Fuente: Elaboración propia.

Densidad de las mezclas A, B y C.

Muestra	Densidad (g/ml)	Masa
1	0,976	326,8
2	0,921	271,4
3	1,027	177,5
4	0,890	340,1
5	0,889	324,9
6	0,843	429,3
7	0,833	1081,2

Fuente: Elaboración propia.

Mezcla	Muestra 1	Muestra 3	Masa (g)	Densidad Mezcla (g/ml)
A (1-3)	326,8	177,5	504,3	99,470
% Muestra en la mezcla	64,802	35,197	100	

Fuente: Elaboración propia.

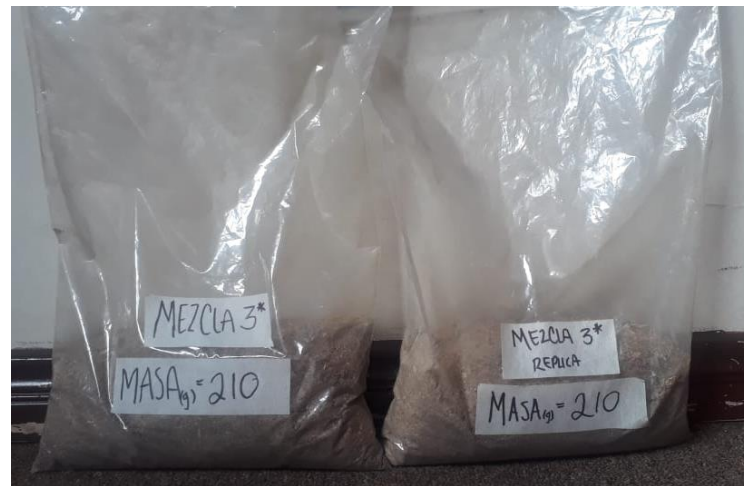
Mezcla	Muestra 2	Muestra 4	Muestra 5	Masa (g)	Densidad Mezcla (g/ml)
B (2-4-5)	271,4	340,1	324,9	936,4	89,939
% Muestra en la mezcla	28,983	36,319	34,696	100	

Fuente: Elaboración propia.

Mezcla	Muestra 6	Muestra 7	Masa (g)	Densidad Mezcla (g/ml)
C (6-7)	429,3	1081,2	1510,5	83,627
% Muestra en la mezcla	28,421	71,578	100	

Fuente: Elaboración propia.

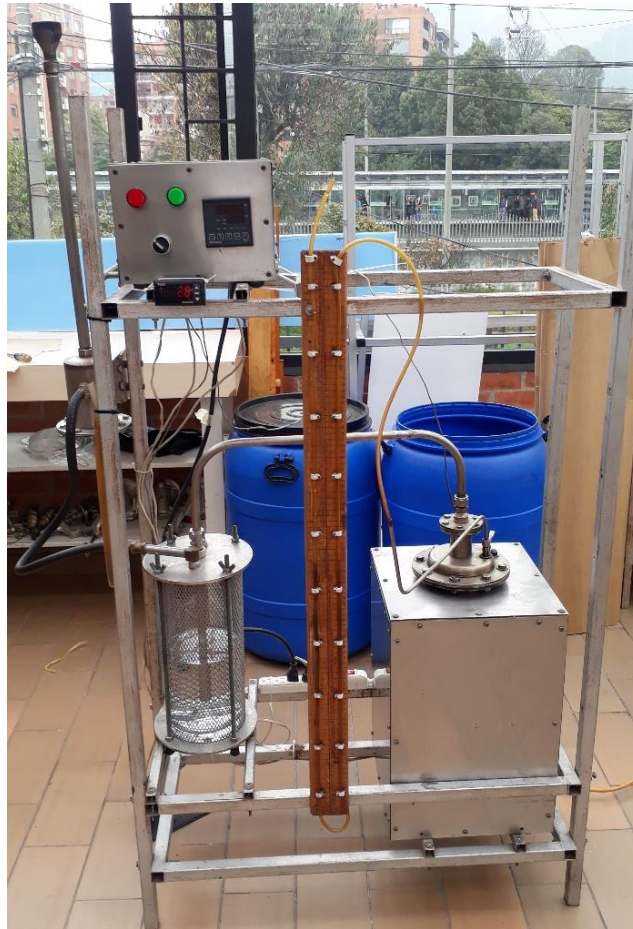
Muestras a pirolizar (1*, 2* y 3*)



Fuente: Elaboración propia

Proceso de pirólisis de maderas tropicales

Reactor pirolítico, Laboratorios Calderón



Fuente: Elaboración propia.

Especificaciones de operación del equipo.

- Temperatura máxima: 700°C
- Temperatura óptima: 600°C
- Presión: P Atm + 20 cm H₂O
- Tipo de reactor: SemiBatch.
- Capacidad mínima: 150 g
- Capacidad Máxima: 1.5 kg
- Capacidad volumétrica: 4 Litros.
- Tiempo de residencia: 4 a 5 horas (Depende de la cantidad de materia a pirolizar).
- Dimensiones: 15 cm diámetro X 40 cm de altura.

Procesos pirolíticos mezclas 1*, 2*, 3* y replicas.

- **Mezcla 1* Carga 210 g, Temperatura: 650°C, Tiempo: 4 h**



Fuente: Elaboración propia.

Progresión proceso mezcla 1*

Hora	T C4X (°C)	T PX7 (°C)	Presión (cm H2O)	Observaciones
9:05	28	17	0	Encendido
9:15	28	78	10	Burbujeo leve
9:25	36	232	10	
9:35	68	360	10	Aumenta burbujeo en condensador húmedo
9:45	86	459	10	Se observa gas
9:55	87	539	10	El agua cambia de color de transparente a amarillo
10:05	91	602	12	Fuerte olor a gas
10:15	100	652	12	Aumenta la capa de líquido sobre el agua
10:25	108	658	12	Prende Tea.
10:35	114	648	12	
10:45	123	650	10	
10:55	133	651	12	
11:05	141	651	16	
11:15	149	651	18	Disminuye el olor a gas.
11:25	155	649	16	Disminuye burbujeo
11:35	166	651	12	
11:45	171	650	10	
11:55	174	651	10	
12:05	175	650	10-12	Variación de presión constantemente
12:15	176	650	12-14	Burbujeo escaso
12:25	177	650	12-14	
12:35	178	651	10-14	
12:45	178	649	10	
12:55	180	650	10	
1:05	182	650	12	Fin del proceso

Fuente: Elaboración propia.

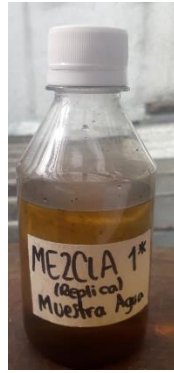
- Mezcla 1* (Replica) Carga 210 g, Temperatura: 650°C, Tiempo: 4 h



Progresión proceso mezcla 1* (Replica)

Hora	T C4X (°C)	T PX7 (°C)	Presión (cm H ₂ O)	Observaciones
9:50	38	18	0	Encendido
10:00	45	158	10	Burbujeo leve.
10:10	63	316	10	
10:20	81	431	10	Aumenta burbujeo en condensador húmedo.
10:30	90	525	10	Se observa gas
10:40	95	591	10	Burbujeo constante, se comienza a formar una capa de líquido sobre el agua del condensador húmedo.
10:50	110	649	12	Fuerte olor a gas, Prende Tea.
11:00	122	659	12	Aumenta la capa de líquido sobre el agua.
11:10	124	650	12	
11:20	136	651	12	
11:30	141	649	12	
11:40	145	650	14	Disminuye el burbujeo.
11:50	151	650	12	
12:00	155	651	10	Disminuye el olor a gas.
12:10	161	650	12	Burbujeo escaso
12:20	164	650	12	
12:30	178	651	12	
12:40	171	650	12	
12:50	175	650	12	
1:00	178	650	14	Burbujeo leve.
1:10	181	650	14	
1:20	181	650	10-14	Variación de presión constantemente
1:30	183	650	10-12	
1:40	184	650	8-12	
1:50	185	650	10	Fin del proceso

Fuente: Elaboración propia.



Fuente: Elaboración propia.

- **Mezcla 2* Carga 210 g, Temperatura: 650°C, Tiempo: 4 h**

Progresión proceso mezcla 2*

Hora	T C4X (°C)	T PX7 (°C)	Presión (cm H2O)	Observaciones
8:25	35	21	0	Encendido
8:35	41	124	10	Burbujeo leve
8:45	52	284	10	Burbujeo constante
8:55	85	417	10	
9:05	87	518	10	Aumenta burbujeo
9:15	88	597	10	Se tiñe el agua de amarillo
9:25	95	659	10	Formación de gas
9:35	107	655	10	Formación de capa de aceite sobre el agua
9:45	115	649	12	
9:55	122	650	12	Olor fuerte a gas, Prende Tea
10:05	128	651	10	
10:15	138	649	12	
10:25	144	649	10-12	Disminuye el burbujeo
10:35	150	650	12	
10:45	157	651	10-12	Burbujeo escaso
10:55	158	649	10	
11:05	161	650	0-12	Varia la presión constantemente
11:15	165	649	8-10	
11:25	170	650	10	
11:35	172	650	10	
11:45	173	650	10	Burbujeo leve
11:55	174	650	10	
12:05	175	650	8-10	Desaparece el burbujeo
12:15	176	649	8-12	
12:25	178	650	8-10	Fin del proceso.

Fuente: Elaboración propia.



Fuente: Elaboración propia.

- **Mezcla 2* (Replica) Carga 210 g, Temperatura: 650°C, Tiempo: 4 h**

Progresión proceso mezcla 2* (Replica)

Hora	T C4X (°C)	T PX7 (°C)	Presión (cm H2O)	Observaciones
9:05	73	21	0	Encendido
9:15	38	140	14	Burbujeo leve
9:25	53	277	12	Aumenta burbujeo
9:35	83	400	12	Olor a gas, burbujeo constante
9:45	88	493	12	El agua se tiñe de amarillo
9:55	88	567	12	Apárese capa de aceite sobre el agua
10:05	92	624	12	
10:15	113	653	12	
10:25	122	649	12	
10:35	128	651	12	
10:45	136	650	12-14	Disminuye el burbujeo
10:55	139	652	10-12	
11:05	143	650	12	
11:15	148	650	10-14	Burbujeo escaso
11:25	153	650	12	
11:35	155	650	10-12	
11:45	160	650	10-12	
11:55	161	651	10	
12:05	162	650	12	
12:15	164	650	10	
12:25	166	650	10	
12:35	166	650	10-12	Desaparece burbujeo
12:45	167	650	10-14	
12:55	171	650	10-12	
1:05	174	650	12	Fin del proceso

Fuente: Elaboración propia.



Fuente: Elaboración propia.

- **Mezcla 3* Carga 210 g, Temperatura: 650°C, Tiempo: 4 h**

Progresión proceso mezcla 3*

Hora	T C4X (°C)	T PX7 (°C)	Presión (cm H2O)	Observaciones
8:45	33	21	0	Encendido
8:55	36	133	12	Burbujeo leve
9:05	57	297	12	Aumenta burbujeo
9:15	86	434	12	
9:25	88	536	14	Burbujeo constante, el agua cambia de color a amarillo.
9:35	88	612	14	
9:45	99	650	14	Olor a gas
9:55	108	656	14	Salida del gas por el Tea pero no se alcanza a prender, no hay llama.
10:05	115	648	14	
10:15	122	651	14	
10:25	131	651	14-16	Disminuye burbujeo
10:35	141	650	10-12	
10:45	145	650	10-14	
10:55	151	650	10-14	Oscila constantemente la presión
11:05	156	650	10-14	
11:15	158	650	10-14	
11:25	161	650	10-14	
11:35	167	650	10-14	Burbujeo escaso
11:45	169	649	10-14	
11:55	170	650	10-12	
12:05	173	650	10-12	
12:15	175	651	10	
12:25	178	650	12	Desaparece burbujeo
12:35	178	650	14-16	
12:45	179	650	12	Fin del proceso

Fuente: Elaboración propia. ¿



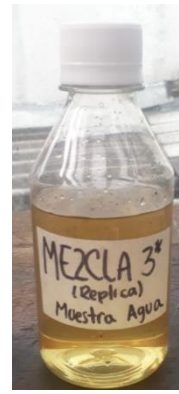
Fuente: Elaboración propia.

- **Mezcla 3* (Replica) Carga 210 g, Temperatura: 650°C, Tiempo: 4 h**

Progresión proceso mezcla 3* (Replica)

Hora	T C4X (°C)	T PX7 (°C)	Presión (cm H2O)	Observaciones
8:50	34	21	0	Encendido
9:00	56	289	10	Inicia burbujeo leve
9:10	64	335	10	Aumento burbujeo
9:20	87	440	10	Olor a gas
9:30	87	537	10	Se observa gas en la parte superior del agua
9:40	87	608	12	El agua se torna de color amarillo
9:50	95	658	14	
10:00	104	656	14	
10:10	109	626	12	
10:20	111	646	10	
10:30	126	655	12	
10:40	136	650	10-12	
10:50	146	649	10	Disminuye burbujeo
11:00	146	651	10	
11:10	156	650	10-12	
11:20	161	652	10-12	
11:30	164	650	8-12	
11:40	166	650	10-12	Variación de presión
11:50	167	650	10-12	
12:00	168	651	10-12	Burbujeo escaso
12:10	171	650	10-12	
12:20	171	650	10-12	Desaparece burbujeo
12:30	173	650	8-10	
12:40	175	650	8-10	
12:50	176	650	8-10	Fin del proceso

Fuente: Elaboración propia.



Fuente: Elaboración propia.

Muestra de productos

- Sólido (Biochar)



Fuente: Elaboración propia.

- Líquido (Alquitrán)





Fuente: Elaboración propia.

- **Mezcla 3* (Replica para muestreo de gas) Carga 210 g, Temperatura: 700°C, Tiempo: 4 h**

Progresión proceso mezcla 3* (Replica para muestreo de gas)

Hora	T C4X (°C)	T PX7 (°C)	Presión (cm H2O)	Observaciones
8:30	36	18	0	Encendido
8:40	38	99	16	Burbujeo leve
8:50	51	280	14	
9:00	83	412	14	Olor a gas, Aumenta burbujeo
9:10	86	530	14	Conecta bolsa Tedlar a la salida del gas
9:20	87	592	14	Formación de aceite sobre el agua
9:30	89	653	14	El agua se tiñe de amarillo
9:40	102	701	14	Desconecta la bolsa
9:50	115	707	14	Prende Tea
10:00	123	700	14	
10:10	133	700	14	
10:20	144	700	12-14	Disminuye el burbujeo
10:30	150	700	12-14	
10:40	158	700	12-16	
10:50	163	700	10-14	
11:00	168	700	10-12	
11:10	171	700	14-16	Burbujeo escaso
11:20	175	700	12-14	
11:30	177	702	12-14	
11:40	180	699	10-14	
11:50	182	700	12	
12:00	188	700	12	
12:10	191	700	12-14	Desaparece burbujeo
12:20	191	700	12-14	
12:30	192	700	10-12	Fin del proceso

Fuente: Elaboración propia.



Fuente: Elaboración propia.

Cromatografía de gases

Bolsa tedlar



Fuente: Elaboración propia.

Cromatógrafo (GC/MS)

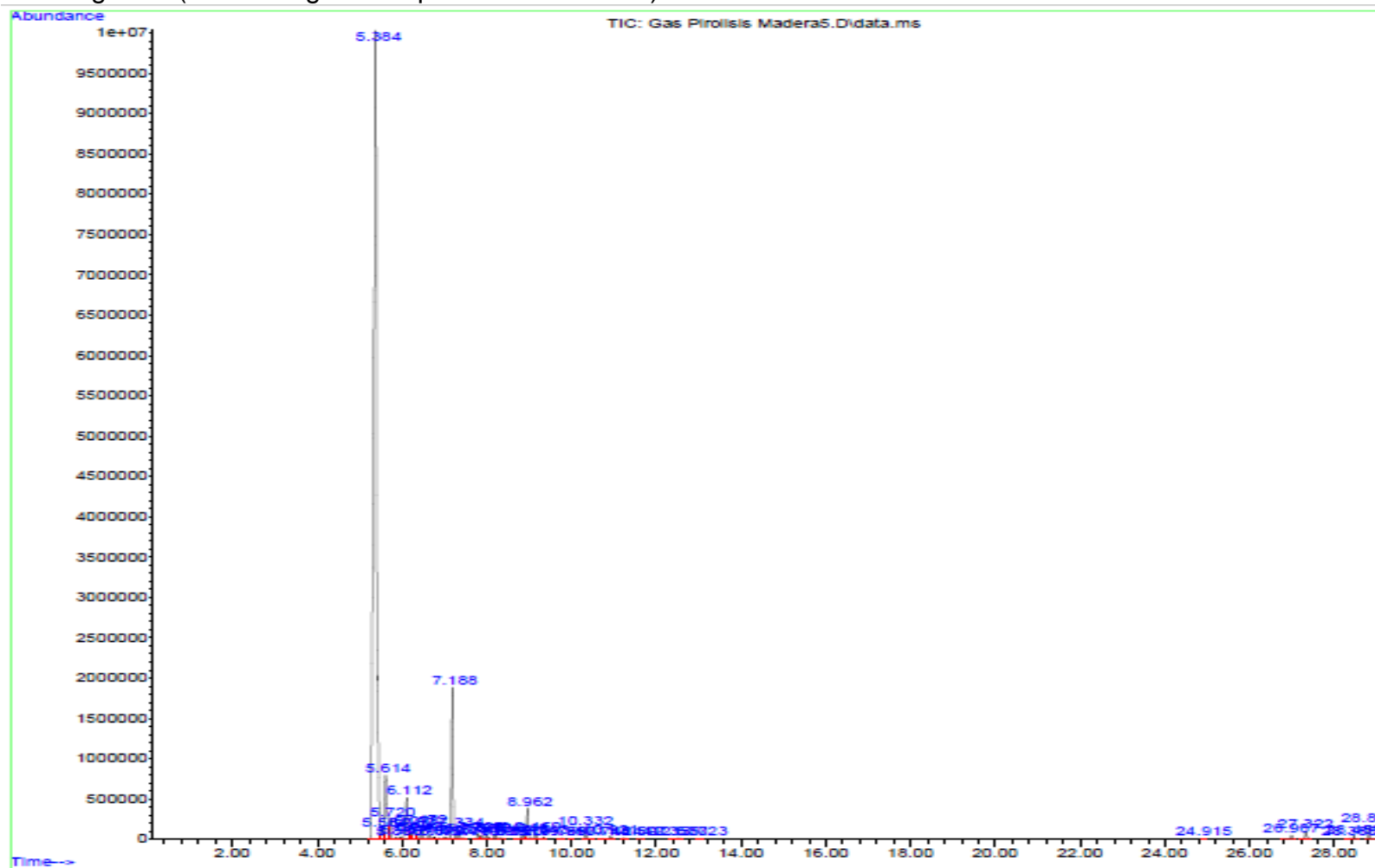


Fuente: Elaboración propia.

Especificaciones del equipo:

- Cromatógrafo de gases acoplado a detector de masas Agilent 6850 Series II Network GC System.
- Detector de Masas (cuadrupolo sencillo) Agilent 5975B MSD.
- Columna disponible DB5-ms (60mx0.25mmx0.25µm).
- Modo de Inyección: Manual.
- Split 20:1.
- Volumen de Inyección: 500 uL.
- Temperatura del Puerto de Inyección: 250 °C.
- Detector en modo SCAN.
- Rampa de temperatura 50°C.
- Hold time 3 minutos, 10 °C / min hasta 280°C Hold time 1 min.
- Tiempo total de corrida 27 min.

Cromatograma (Producto gaseoso pirólisis de madera)



Fuente: Laboratorios de química Universidad Javeriana

ANEXO C.
ESPECIFICACIONES TECNICAS DEL PROCESO

Cálculo poder calorífico de gas

Compuesto	%	Volumen μ l	Volumen ml	Densidad (g/ml)	Masa (g)	Fracción másica	Poder calorífico (kWh/kg)	Xi*PC
Dióxido de carbono	73,64	368,2	0,3682	1,842	0,6782244	0,823835733		0
Cloro metano	0,55	2,75	0,00275	2,22	0,006105	0,007415712	1,6722	0,01240055
Buteno	4,53	22,65	0,02265	1,81	0,0409965	0,04979824	12,5	0,622478
Metanotiol	1,02	5,1	0,0051	0,9	0,00459	0,00557545		0
Ciclopropano	0,89	4,45	0,00445	1,88	0,008366	0,010162138	13,9444	0,14170491
Butano	0,12	0,6	0,0006	0,00252	1,512E-06	1,83662E-06	13	2,3876E-05
Furano	4,34	21,7	0,0217	0,94	0,020398	0,024777347	6,9722	0,17275262
Isopreno	0,53	2,65	0,00265	0,681	0,0018047	0,002192099		0
ciclopentadieno	1,37	6,85	0,00685	0,786	0,0053841	0,006540039		0
1-2 Pentadieno	0,32	1,6	0,0016	0,683	0,0010928	0,001327419	12,4357	0,01650738
Ciclopentano	0,64	3,2	0,0032	0,751	0,0024032	0,002919155	12,7778	0,03730038
1-Buteno	0,11	0,55	0,00055	0,0024	1,32E-06	1,6034E-06	12,5	2,0042E-05
2-Butenal	0,07	0,35	0,00035	0,846	0,0002961	0,000359671	9,2978	0,00334414
Hexeno	0,13	0,65	0,00065	0,673	0,0004375	0,000531368	12,3444	0,00655942
Metilfurano	8,12	40,6	0,0406	0,927	0,0376362	0,045716501		0
1-Penteno	0,08	0,4	0,0004	0,64	0,000256	0,000310962	12,4357	0,00386703

Ciclohexadieno	0,07	0,35	0,00035	0,841	0,0002944	0,000357545	11,7384	0,00419701
Benceno	0,42	2,1	0,0021	0,876	0,0018396	0,002234553	11,27	0,02518341
Hepteno	0,04	0,2	0,0002	0,697	0,0001394	0,000169328	12,7778	0,00216365
Ciclopentanona	0,04	0,2	0,0002	0,95	0,00019	0,000230792		0
Dimetilfurano	0,39	1,95	0,00195	0,89	0,0017355	0,002108103		0
Fenol	0,11	0,55	0,00055	1,07	0,0005885	0,000714848	9,3056	0,00665209
Ciclobutano	0,05	0,25	0,00025	0,72	0,00018	0,000218645	12,7139	0,00277983
Cicloheptano	0,07	0,35	0,00035	0,811	0,0002839	0,000344791	12,7778	0,00440567
Etanona	0,17	0,85	0,00085		0	0		0
Tolueno	0,62	3,1	0,0031	0,867	0,0026877	0,003264736	11,36	0,0370874
trimetilpirazol	0,06	0,3	0,0003		0	0		0
Piridina	0,04	0,2	0,0002	0,982	0,0001964	0,000238566	9,414	0,00224586
Etilbenceno	0,04	0,2	0,0002	0,866	0,0001732	0,000210385	11,3897	0,00239622
Ácido acético	0,03	0,15	0,00015	1,05	0,0001575	0,000191314	4,6389	0,00088749
Ácido sulfúrico	0,15	0,75	0,00075	1,84	0,00138	0,001676279		0
Tributil acetilcitrate	0,43	2,15	0,00215	1,04	0,002236	0,002716058		0
Ácido octadecanoico	0,04	0,2	0,0002	0,941	0,0001882	0,000228606		0
Pentadecano	0,15	0,75	0,00075	0,769	0,0005768	0,000700575		0
Tricosano	0,62	3,1	0,0031	0,778	0,0024118	0,002929601		0
TOTAL	100	500	0,5		0,823252	1	Pcmezcla	1,10495699

**ANEXO D.
PRESUPUESTO DE INVERSIÓN**

Valor (\$) un trabajador al mes

CONCEPTOS	Explicaciones	VALOR mes un trabajador
Salarios y Transporte		
Salario Básico	El pactado entre las partes	781.242
Recargos Nocturnos	Sobre el valor de la hora básica se recarga el 35%	0
Recargo Dominical, festivos, compensatorios	Por trabajar en domingo o festivo	0
Horas Extras	Lo que exceda de 8 horas día o 48 a la semana, o la que se pacto	0
Subtotal Salario		\$ 781.242
Prestaciones Sociales y Vacaciones Provisión		
Cesantías	Salarios + Sub. Transporte./12 meses	72.454
Intereses sobre Cesantías	El 12% del valor de las cesantías	8.695
Primas	Salarios + Sub. Transporte./12 meses	72.454
Vacaciones	Equivale a 15 días hábiles de salario al año	32.552
Subtotal Prestaciones		\$ 186.155
Seguridad Social		
Salud (Total 12,5%, Empresa: 8,5%)	97600	66.400
Pensión (Total 16%, Empresa 12%)	125000	93.800
Subtotal Seguridad Social		\$ 160.200
TOTAL MENSUAL		\$ 1.127.597
Costo Total Anual para un trabajador		\$ 13.531.164

Fuente: Elaboración propia