

EVALUACIÓN DEL PROCESO DE TORREFACCIÓN PARA EL MEJORAMIENTO
DE LAS PROPIEDADES ENERGÉTICAS DE LOS RESIDUOS FORESTALES

DIANA MARCELA DURÁN HERNÁNDEZ
JESSICA ANDREA AGRESOTT RAMÍREZ

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BOGOTÁ D.C.
2016

EVALUACIÓN DEL PROCESO DE TORREFACCIÓN PARA EL MEJORAMIENTO
DE LAS PROPIEDADES ENERGÉTICAS DE LOS RESIDUOS FORESTALES

DIANA MARCELA DURÁN HERNÁNDEZ
JESSICA ANDREA AGRESOTT RAMÍREZ

Proyecto integral de grado para optar al título de
INGENIERA QUÍMICA

Director
Pedro Oswaldo Guevara
Ingeniero Químico
Msc. Ingeniería Ambiental

Asesor
Edgar Fernando Moreno
Ingeniero Químico

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BOGOTÁ D.C.
2016

Nota de Aceptación

I.Q. EDGAR F. MORENO

I.Q. DIANA CUESTA

I.Q. MARÍA A. PARRA

Bogotá D.C. 13 de julio de 2016

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

Ing. ANA JOSEFA HERRERA VARGAS

Secretario General

Dr. JUAN CARLOS POSADA GARCÍA-PEÑA

Decano Facultad de Ingenierías

Ing. JULIO CESAR FUENTES ARISMENDI

Director Programa Ingeniería Química

Ing. LEONARDO de JESÚS HERRERA GUITIÉRREZ

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

DEDICATORIA

A mis papás por la confianza en mi trabajo y a mis hermanas por la motivación e interés en el proyecto.

Diana Durán

A Dios que me permitió llegar donde estoy el día de hoy, a mis padres por todo el cariño y la educación que me han regalado, a Andrés Aragón por el apoyo incondicional durante el desarrollo del proyecto.

Jessica Agresott

AGRADECIMIENTOS

A nuestra amiga Química Laura Landazábal por el apoyo y la paciencia en enseñarnos a manejar los equipos, al profesor José María Rincón por su colaboración, al Ingeniero Pedro Guevara por su dirección y sugerencias para realizar de la mejor manera el trabajo y a nuestro asesor, el Ingeniero Fernando Moreno por su atención amable, y consejos.

CONTENIDO

	pág.
RESUMEN	26
INTRODUCCIÓN	27
OBJETIVOS	28
1. MARCO TEÓRICO	29
2. CARACTERIZACIÓN ENERGÉTICA DE LOS RESIDUOS FORESTALES	36
2.1 ADECUACIÓN DE LA BIOMASA RESIDUAL	36
2.1.1 Homogenización de los residuos forestales en troncos	37
2.1.2 Homogenización de los residuos forestales en tamaño de partícula	38
2.2 ANÁLISIS DE CARACTERIZACIÓN	40
2.2.1 Poder Calorífico	41
2.2.2 Contenido de Humedad	41
2.3 SELECCIÓN DE MUESTRAS Y EQUIPOS	42
2.3.1 Equipos	42
2.3.2 Selección de Muestras	44
3. CONDICIONES IDEALES DE OPERACIÓN	46
3.1 DETERMINACIÓN TAMAÑO DE PARTÍCULA	47
3.1.1 Primera etapa de torrefacción	47
3.1.2 Pruebas de TGA y humedad	49
3.1.2.1 Curvas por TGA	51
3.1.2.2 Contenido de humedad	56
3.1.3 Matriz de multicriterios ponderados para tamaño de partícula	56
3.1.4 Análisis del tamaño de partícula como constante	62
3.2 NUMERO DE EXPERIMENTOS VARIANDO TEMPERATURA Y TIEMPO DE RESIDENCIA	63
3.2.1 Variables de estudio	63
3.2.1.1 Temperatura	63
3.3 MATRIZ DE EXPERIMENTOS	64
3.3.1 Número de montajes	64
3.3.2 Variables fijas	64
3.3.3 Variables móviles	64
3.3.4 Número de réplicas	64
3.4 RESULTADOS DE LA EXPERIMENTACIÓN	64
3.4.1 Torrefacción a Diferentes tiempos y Temperaturas	65
3.4.2 Curvas Termogravimétricas	67

3.4.3 Humedad	72
3.4.4 Cenizas	73
3.4.5 Poder Calorífico	74
3.4.6 Hidrofobicidad	74
3.5 ANÁLISIS DE RESULTADOS	77
3.5.1 Humedad	77
3.5.2 Cenizas	77
3.5.3 Poder calorífico	78
3.5.4 Hidrofobicidad	79
3.6 DETERMINACIÓN DE LAS CONDICIONES IDEALES DEL OPERACIÓN A NIVEL LABORATORIO	79
3.7 TORREFACCIÓN DE LA BIOMASA RESIDUAL FORESTAL A NIVEL PLANTA PILOTO CON LAS CONDICIONES IDEALES IDENTIFICADAS	82
3.7.1 Caracterización final de la biomasa torrefactada	82
3.7.1.1 Poder calorífico	83
3.7.1.2 Contenido de humedad	83
3.7.1.3 Porcentaje de cenizas	83
3.8 BALANCES DE MASA Y ENERGÍA	84
3.8.1 Balance global de masa	84
3.8.2 Balance global de energía	85
4. COSTOS INVOLUCRADOS EN EL PROCESO DE TORREFACCIÓN	90
4.1 COSTOS DE TRANSPORTE	90
4.1.1 Residuos forestales crudos	92
4.1.2 Residuos forestales torrefactados	92
4.2 COSTOS ENERGÉTICOS	93
4.2.1 Gasto energético del horno rotatorio a nivel planta piloto	93
4.2.2 Cantidad de Biomasa para generar 1 kWh de energía	95
4.3 ESTIMACIÓN DEL PRECIO DEL KWH A PARTIR DE BIOMASA TORREFACTADA	96
4.4 VIABILIDAD EN TÉRMINOS ENERGÉTICOS DEL PROCESO DE TORREFACCIÓN COMO MÉTODO DE DENSIFICACIÓN ENERGÉTICA	97
5. CONCLUSIONES	99
6. RECOMENDACIONES	101
BIBLIOGRAFÍA	103
ANEXOS	107

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Poder calorífico de algunas especies forestales	35
Tabla 2. Composición química de las partes del árbol encontradas en la recolección de biomasa	38
Tabla 3. Medidas promedio de los tamaños de partícula identificados	40
Tabla 4. Medida de las mallas utilizadas en la operación de tamizado	40
Tabla 5. Humedades calculadas con análisis termogravimétrico	42
Tabla 6. RMSD para las curvas de TGA	52
Tabla 7. Registro de Humedades de la BR cruda y la BR torrefactada	56
Tabla 8. Forma de la Matriz de Richman	58
Tabla 9. Pendientes de las curvas del TGA y %H para cada tamaño de partícula	58
Tabla 10. Valores mínimos y máximos y su correspondiente valor asignado	58
Tabla 11. Datos normalizados para tamaño de partícula.	60
Tabla 12. Matriz de experimentos	64
Tabla 13. RMSD para diferentes condiciones de temperatura y tiempo para las variables de temperatura y masa	67
Tabla 14. Cálculo de humedades (%) para diferentes condiciones de torrefacción	73
Tabla 15. Resultados de cenizas (%) para diferentes condiciones de operación	74
Tabla 16. Resultados prueba de poder calorífico	74
Tabla 17. Masa de la biomasa durante los ensayos de hidrofobicidad	76
Tabla 18. Porcentajes de humedad de la biomasa.	76

Tabla 19. Comparación del poder calorífico de la biomasa cruda y la biomasa torrada	78
Tabla 20. Datos normalizados para cada uno de los criterios establecidos	81
Tabla 21. Porcentaje de error encontrado en la caracterización a nivel laboratorio y nivel planta piloto para un muestra torrefactada a 260°C y 80 min con el mismo tamaño de partícula.	84
Tabla 22. Comparativo entradas y salidas del horno rotatorio	89
Tabla 23. Costos CAPEX	96
Tabla 24. Costos OPEX	96
Tabla 25. Parámetros para calcular el precio del kWh a partir de biomasa	97
Tabla 26. Identificación de muestras.	109

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Tipos de Biomasa	30
Figura 2. Ciclo de vida de la Biomasa	31
Figura 3. Tipos de Biocombustibles. A) Biocombustible Líquido. B) Biocombustible Sólido. C) Biocombustible Gaseoso.	32
Figura 4. Biomasa torrefactada.	33
Figura 5. Estructura de la biomasa lignocelulósica.	34
Figura 6. Biomasa residual para recolección en el Jardín Botánico de Bogotá	37
Figura 7. Biomasa Residual llevada a Tecsol Ltda para estudio	38
Figura 8. Tamaños de partícula identificados: bandeja 10 (trozos medianos, izquierda), bandeja 3 (trozos grandes, derecha)	39
Figura 9. Mallas resultantes después de tamizar	39
Figura 10. Horno rotatorio de torrefacción	43
Figura 11. Equipo termogravimétrico	44
Figura 12. Horno rotatorio de torrefacción a nivel planta piloto	44
Figura 13. Esquema simplificado del proceso de torrefacción	45
Figura 14. Biomasa torrefactada proveniente de la bandeja 11	48
Figura 15. Biomasa torrefactada proveniente de la bandeja 10	48
Figura 16. Biomasa torrefactada proveniente de la bandeja 3	48
Figura 17. Biomasa torrefactada proveniente de la malla 18	48
Figura 18. Biomasa torrefacta proveniente de la malla 20	49
Figura 19. Biomasa torrefactada proveniente de finos	49

Figura 20. TGA para la bandeja 11 (izquierda primer ensayo, centro, duplicado, derecha triplicado)	50
Figura 21. TGA para la bandeja 10 (izquierda primer ensayo, centro, duplicado, derecha triplicado)	50
Figura 22. TGA para la bandeja 3 (izquierda primer ensayo, centro, duplicado, derecha triplicado)	50
Figura 23. TGA para la malla 18 (izquierda primer ensayo, centro, duplicado, derecha triplicado)	50
Figura 24. TGA para la malla 20 (izquierda primer ensayo, centro, duplicado, derecha triplicado)	51
Figura 25. TGA para finos (izquierda primer ensayo, centro, duplicado, derecha triplicado)	51
Figura 26. Índices de priorización de tamaños de partícula priorizados	62
Figura 27. Biomasa torrefactada a 240°C durante 40 min (izquierda), 60 min (mitad) y 80 min (derecha) junto con su réplica (color rosado)	65
Figura 28. Biomasa torrefactada a 260°C durante 40 min (izquierda), 60 min (mitad) y 80 min (derecha) junto con su réplica (color rosado)	66
Figura 29. Biomasa torrefactada a 280°C durante 40 min (izquierda), 60 min (mitad) y 80 min (derecha) junto con su réplica (color rosado)	66
Figura 30. Biomasa cruda y torrefactada antes de ser sumergida en agua.	75
Figura 31. Biomasa para prueba de hidrofobicidad en agitación	75
Figura 32. Índices de priorización	81
Figura 33. Esquema de corrientes de materia a través del horno rotatorio	85
Figura 34. Esquema de corrientes de energía a través del horno rotatorio	89
Figura 35. Trayecto Planta de torrefacción- Termoguajira (izquierda) y Jardín Botánico de Bogotá – Termoguajira (derecha)	91

LISTA DE GRÁFICAS

	pág.
Gráfico 1. Comparativo de TGA con torrefactados de la bandeja 11	53
Gráfico 2. Comparativo de TGA con torrefactados de la bandeja 10	53
Gráfico 3. Comparativo de TGA con torrefactados de la bandeja 3	54
Gráfico 4. Comparativo de TGA con torrefactados de la malla 18	54
Gráfico 5. Comparativo de TGA con torrefactados de la malla 20	55
Gráfico 6. Comparativo de TGA con torrefactados de fondos	55
Gráfico 7. Función de transformación para el criterio de temperatura vs tiempo	59
Gráfico 8. Función de transformación para el criterio de temperatura vs masa	59
Gráfico 9. Función de transformación para el criterio de tiempo vs masa	59
Gráfico 10. Función de transformación para el criterio de Porcentaje de Humedad	60
Gráfico 11. TGA para Temperatura 240°C y Tiempo de 40 minutos	68
Gráfico 12. TGA para Temperatura 240°C y Tiempo de 60 minutos	68
Gráfico 13. TGA para Temperatura 240°C y Tiempo de 80 minutos	69
Gráfico 14. TGA para Temperatura 260°C y Tiempo de 40 minutos	69
Gráfico 15. TGA para Temperatura 260°C y Tiempo de 60 minutos	70
Gráfico 16. TGA para Temperatura 260°C y Tiempo de 80 minutos	70
Gráfico 17. TGA para Temperatura 280°C y Tiempo de 40 minutos	71
Gráfico 18. TGA para Temperatura 280°C y Tiempo de 60 minutos	71
Gráfico 19. TGA para Temperatura 280°C y Tiempo de 80 minutos	72
Gráfico 20. Función de transformación para porcentaje de humedad	120

Gráfico 21 .Función de transformación para poder calorífico	120
Gráfico 22. Función de transformación para porcentaje de cenizas	121
Gráfico 23. Función de transformación para Hidrofobicidad	121

LISTA DE ECUACIONES

	pág.
Ecuación 1. Cálculo porcentaje de diferencia entre datos	36
Ecuación 2. Cálculo de porcentaje de humedad	41
Ecuación 3. Calculo de número de ejecuciones	47
Ecuación 4. Cálculo del RMSD	52
Ecuación 5. Promedio realizado entre ensayo y replica	72
Ecuación 6. Cálculo de cenizas	73
Ecuación 7. Cálculo de cenizas reducida	73
Ecuación 8. Porcentaje de Desviación	78
Ecuación 9. Cálculo porcentaje de error	83
Ecuación 10. Balance global de materia en el horno rotatorio	85
Ecuación 11. Balance global de energía en el horno rotatorio a nivel planta piloto	85
Ecuación 12. Cálculo de la energía del combustible	86
Ecuación 13. Cálculo masa de gas natural utilizado en el proceso de torrefacción	86
Ecuación 14. Energía del sistema de rotación	87
Ecuación 15. Energía que obtiene la biomasa torrefactada	87
Ecuación 16. Cálculo de la energía de los gases de combustión	87
Ecuación 17. Cálculo energía de gases de combustión: CO ₂	88
Ecuación 18. Cálculo de energía de gases de combustión: H ₂ O	88
Ecuación 19. Costo de transporte de biomasa residual	91

Ecuación 20. Cálculo energía transportada contenida en biomasa cruda	92
Ecuación 21. Cálculo energía transportada contenida en la biomasa torrefactada	92
Ecuación 22. Cálculo del gasto energético proveniente del gas.	93
Ecuación 23. Cálculo del gasto energético ejercido por el quemador	94
Ecuación 24. Cálculo del gasto energético ejercido por el sistema de rotación	94
Ecuación 25. Conversión de kWh a kcal	95
Ecuación 26. Cálculo de los kilogramos de biomasa para generar 1 kWh	95
Ecuación 27. Relación gasto energético – energía contenida en la BR torrefactada	98

LISTA DE CUADROS

	pág.
Cuadro 1. Resumen de los análisis a realizar para encontrar las mejores condiciones de torrefacción	46
Cuadro 2. Criterios de priorización	57
Cuadro 3. Peso para cada criterio en la determinación del tamaño de partícula	61
Cuadro 4. Criterios evaluados para el proceso de priorización	80

LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo A. Resultado de análisis de poder calorífico para muestra de biomasa residual cruda	108
Anexo B. Resultados de análisis de poder calorífico para 9 muestras de biomasa torrefactada a diferentes condiciones de operación	109
Anexo C. Resultado de análisis de poder calorífico para muestra torrefactada a 260°C y 80 min	119
Anexo D. Funciones de transformación para la priorización de tiempo de residencia y temperatura de torrefacción	120
Anexo E. Cotización de transporte de biomasa residual	122
Anexo F. Factura de gas utilizada para conocer el precio del m3	123

LISTA DE SIGLAS

°C: grado Celsius

A: amperios

ASTM: American Society for Testing and Materials

B: bandeja

BR: biomasa Residual

BRF: biomasa Residual Forestal

BS: base seca

CAPEX: inversiones en bienes capitales (Capital Expenditures)

Ce: porcentaje en peso de cenizas

cm: centímetro

Cv: capacidad de volc6

g: gramo

Gcal: giga calorías

h: hora

HP: caballos de fuerza

JBB: Jardín Botánico de Bogotá (José Celestino Mutis)

Kcal: kilocalorías

kg: kilogramo

KJ: kilo julios

kWh: kilovatio hora

M: malla

m: metro

m³: metros cúbicos

min: minutos

MJ: mega julios

MV: materia volátil

MWh: megavatios hora

NA: no aplica

OPEX: costos de operación y mantenimiento (Operating Expensive)

P: potencia

PC: poder calorífico

RMSD: desviación de la raíz cuadrada media (Root mean square deviation)

rpm: revoluciones por minuto

s: segundos

T: temperatura

t: tiempo

TGA: Análisis termogravimétrico (Thermogravimetric Analysis)

v: voltios

vs.: versus

W: vatios

GLOSARIO

BIOMASA RESIDUAL CRUDA: biomasa residual sin ningún tipo de tratamiento, en este caso, sin someterse al proceso de torrefacción.

BIOMASA RESIDUAL FORESTAL: “generada en operaciones de limpieza o poda, procede de trabajos silvícolas y/o residuos de las industrias forestales”¹.

BIOMASA RESIDUAL: subproductos que se derivan de las transformaciones naturales o industriales que se llevan a cabo en la materia orgánica.

BIOMASA TORREFACTADA: también llamada biomasa torrada, se refiere a la biomasa después de someterse al proceso de torrefacción.

BLANCO: sinónimo de Patrón. Se utiliza como referencia en química al momento de realizar una valoración.

BRIQUETEO: consiste en la aglomeración de materiales de granulometría fina, con el objetivo de obtener el producto de mayores dimensiones a través del empleo de aglutinantes, que pueden ser de origen orgánico o mineral, la dimensión normal de las briquetas es a partir de 50mm.²

CELULOSA: “es un homopolisacárido rígido, insoluble, que contiene desde varios cientos hasta varios miles de unidades de glucosa”³.

CHIPEADA: es el estado en que la madera queda una vez pasa por un chipeador, es decir, es descortezada y transformada en astillas.

CO-COMBUSTIÓN: “Consiste en la sustitución de parte del carbón empleado en la central, generalmente entre el 2 y el 20% en energía, por biomasa”⁴.

DENSIFICACIÓN ENERGÉTICA DE BIOMASA RESIDUAL: aumentar la cantidad de energía en un mismo volumen de muestra.

¹ CAMPS, Manuel. Madrid: Los Biocombustibles, 2008. p. 88.

² LIPPEL. Briquetaje y Peletización. [citado el 19 de Julio de 2016]. Disponible en: <<http://siteantigolippel.hospedagemdesites.ws/es/sustentabilidad/briquetaje-y-peletizacion.html#.V4-dabjhChc>>

³ PAZ, Francisco. Guatemala: 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, 2008. p. 9.

⁴ ROYO, Javier; CANALÍS, Paula; SEBASTIAN, Fernando. Co-combustión. [citado el día 19 de mayo de 2016]. Disponible en: <http://api.eoi.es/api_v1_dev.php/fedora/asset/eoi:45272/componente45271.pdf>

ENERGÍA DE LA BIOMASA: de acuerdo a la ley 1715 se define como: “La energía obtenida a partir de aquella fuente no convencional de energía renovable que se basa en la degradación espontánea o inducida de cualquier tipo de materia orgánica que ha tenido su origen inmediato como consecuencia de un proceso biológico y toda materia vegetal originada por el proceso de fotosíntesis, así como de los proceso metabólicos de los organismo heterótrofos, y que no contiene o hayan estado en contacto con trazas de elementos que confieren algún grado de peligrosidad”⁵.

FLUCTUACIÓN: es la variación u oscilación que presentan un grupo de datos.

HEMICELULOSA: “son polisacáridos con grupos heterogéneos, tienen un grado de polimerización entre 100 y 200 en fibras madereras; son insolubles en agua, pero en medio alcalino se disuelven, su función principal es su interacción con la celulosa y lignina para proporcionar rigidez a la pared celular”⁶.

HIDROFOBICIDAD: Es la propiedad de un material de no absorber agua de sus alrededores.

HUMEDAD EN BASE HÚMEDA: es la relación entre la masa de agua contenida en la biomasa y su masa total.

HUMEDAD EN BASE SECA: es la relación entre la masa de agua contenida en la biomasa y su masa seca.

HUMEDAD SUPERFICIAL: también llamada humedad de equilibrio, es la humedad que pierde la biomasa cuando se seca al aire del medio ambiente.

LIGNINA: “es un grupo de compuestos químicos usados en las paredes celulares de las plantas para crear madera”⁷.

MÉTODO DE MULTICRITERIOS PONDERADOS: “constituye una herramienta de apoyo en el proceso de toma de decisiones, especialmente en la planificación, debido a que permite integrar diferentes criterios de acuerdo a la opinión de los participantes, en un solo marco de análisis”⁸

⁵ COLOMBIA. CONGRESO DE LA REPUBLICA. Ley 1715. (13, mayo, 2014). Por medio de la cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al sistema energético nacional. Bogotá D.C., 2014.

⁶ PRINSEN, Pepijn. Sevilla: Composición química de diversos materiales lignocelulósicos de interés industrial y análisis estructural de sus ligninas, 2010. p. 3.

⁷ PAZ. Op. cit., p. 20.

⁸ PEREIRA, Orlando. Matriz Multicriterio Ponderada. 12 de mayo de 2015. [citado el 16 de mayo de 2016]. Disponible en: <<http://administraciont3t2.blogspot.com.co/2015/05/matriz-multicriterio-ponderada.html>>

PELLETIZACIÓN: proceso de densificación más exigente que el briqueteo; en la pelletización las prensas son más exigentes y el proceso más selectivo con los residuos; la dimensión de pellets varía entre 6mm y 16mm.⁹

PODER CALORÍFICO INFERIOR: es el calor desprendido por un kilogramo de combustible, en una combustión en el que el agua del combustible se libera en forma de vapor¹⁰.

PODER CALORÍFICO SUPERIOR: también llamado calor de combustión, es el calor desprendido por un kilogramo de biomasa forestal, el agua de combustión se recoge en estado líquido¹¹.

PORCENTAJE DE HUMEDAD: se refiere a la cantidad de agua contenida en una muestra en condición normal, y la cantidad de agua después de someterse a algún tipo de secado (al ambiente o en horno), este porcentaje de humedad condiciona la cantidad de energía liberada, parte de esta energía se utiliza para vaporizar el agua producida, o el agua que ya lleva la propia biomasa al proceso de combustión¹².

PORCENTAJE DE MATERIA VOLÁTIL: este material es el desprendimiento de sustancias gaseosas de la materia orgánica durante el calentamiento de la BR. La BR con alto contenido de MV combustiona fácilmente, por lo contrario, la BR con bajo porcentaje de MV necesita precalentamiento.

PORCENTAJE EN PESO DE CENIZAS: esta cantidad de cenizas en una biomasa determina la cantidad de combustible que no participa en el proceso de combustión¹³.

RETORTA: es un contenedor en el cual se introduce la biomasa que se va a torrefactor, y está ubicada en el interior del horno rotatorio.

TENDENCIA: se refiere al comportamiento que presenta un número de datos, curvas o muestra.

TORREFACCIÓN: proceso térmico que se aplica a la BR para pasar de una inestable biomasa con alto contenido de humedad y bajo poder calorífico a una BR con buenas propiedades energéticas, resistente al agua, con alto contenido

⁹ LIPPEL. Op. cit., p. 20.

¹⁰ CAMPS. Op. cit., p. 20.

¹¹ *Ibíd.*, p. 88.

¹² *Ibíd.*, p. 88.

¹³ *Ibíd.*, p. 88.

energético. Este proceso se lleva a cabo a temperaturas superiores de 150°C y por debajo de 350°C.

TRONCO: parte estructural de un árbol que soporta las ramas, hojas, flores y frutos, gracias al apoyo de las raíces; su principal contenido es la madera. El tronco está conformado por la albura, cámbium, duramen, y la corteza¹⁴.

¹⁴ PAZ. Op. cit., p. 20.

RESUMEN

El presente documento estudia los cambios en las propiedades energéticas de los residuos forestales provenientes del Jardín Botánico de Bogotá durante el proceso de torrefacción en un horno rotatorio horizontal. La temperatura de torrefacción, el tiempo de residencia y el tamaño de partícula fueron los factores más importantes tomados en cuenta para analizar el cambio de dichas propiedades de la biomasa residual estudiada, la cual presentó un poder calorífico de 4.045 Kcal/kg (BS) y 2,86% (BS) de humedad antes de ser torrefactada.

A través de la metodología de multicriterios ponderados, herramienta de análisis de datos, se realizó la priorización de tamaño de partícula a 250°C y 30 min de residencia, que dio como resultado una astilla con dimensiones promedio de 0,56 cm, 3,44 cm y 1,84 cm de alto, largo y ancho respectivamente.

Una segunda priorización permitió determinar el tiempo de residencia y temperatura de torrefacción (utilizando como criterios el poder calorífico, porcentaje de humedad (%H), contenido de cenizas (%Ce) e hidrofobicidad), estos fueron: 260°C y 80 min, condiciones a las cuales la biomasa presentó un poder calorífico de 4.420 kcal/kg (BS) y 1,85% de humedad (BS), es decir, hubo un incremento del 9,27% en el poder calorífico y una reducción del 35% en la humedad de la muestra.

Finalmente se realizó la validación de las condiciones (260°C, 80 min, tamaño de partícula seleccionado) en un horno rotatorio horizontal a nivel planta piloto, cuyos resultados registraron un porcentaje de error para poder calorífico, % H, % Ce e hidrofobicidad de 1,76%, 7,89%, 18,00%, y 13,70% respectivamente.

Se determinaron los costos involucrados en el proceso de torrefacción, y con ellos y el balance de masa y energía se identificó que el proceso es viable energéticamente, dado que la biomasa torrefactada tiene 218.790 kcal y el gasto energético de los equipos utilizados para producirla es de 146.260 kcal, es decir, se tiene una relación de 1,49, además se estimó el precio de kWh a partir de biomasa sin tener en cuenta la inversión, el valor resultante fue \$129.

Palabras claves: Biomasa Residual, Torrefacción, Poder Calorífico, Porcentaje de humedad, hidrofobicidad.

INTRODUCCIÓN

La biomasa residual juega un papel importante en la producción de energía sustentable debido a que es un recurso renovable, abundante, económico por tratarse de residuos y en algunos casos se encuentra concentrado y disponible.

Sin embargo, algunas propiedades de la biomasa como el alto porcentaje de humedad, y baja densidad energética representan los obstáculos de mayor consideración en su uso como material de alimentación energética para combustibles sólidos, razón por la cual se hace necesario el uso de pretratamientos como la torrefacción.

Durante la torrefacción distintos compuestos orgánicos volátiles son removidos de la biomasa; después de terminado el proceso, el material adquiere condiciones de hidrofobicidad, se vuelve seca y de color marrón, sus nuevas propiedades energéticas hacen su transporte a larga distancias rentable y permite su almacenamiento por largos periodos de tiempo.

En este estudio, el proceso de torrefacción fue realizado para los residuos forestales provenientes del Jardín Botánico de Bogotá utilizando diferentes tamaños de partícula a una temperatura y tiempo de residencia establecidas por literatura y posteriormente con el tamaño de partícula definido se realizó la torrefacción bajo diferentes temperaturas y tiempos de residencia, las propiedades del material torrefactado en un horno rotatorio horizontal fueron investigadas para entender el efecto del proceso de torrefacción al compararlo con las propiedades de la biomasa cruda, y logrando identificar la torrefacción como una solución para el mejoramiento de las propiedades energéticas de la biomasa.

La evaluación del proceso de torrefacción para el mejoramiento de las propiedades energéticas de los residuos forestales se realiza en 3 diferentes etapas: la etapa de caracterización, la etapa de experimentación y la etapa de análisis de costos. La etapa de caracterización consiste en analizar fisicoquímicamente la Biomasa residual antes de la torrefacción. En la etapa de experimentación se encuentran 3 pasos, la determinación del tamaño de partícula, la determinación de las condiciones de operación (temperatura y tiempo de residencia) y la validación de las condiciones de operación. Y por último, la etapa de análisis de costos donde se identifican los costos involucrados en el proceso (costos de transporte, OPEX, CAPEX), con el fin de determinar la viabilidad de la torrefacción como proceso de densificación energética y estimar un precio de kWh a partir de biomasa residual sin tener en cuenta la inversión inicial.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Evaluar el proceso de torrefacción para la densificación energética de los residuos forestales en Industrias Tecsol Ltda. a nivel planta piloto.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Caracterizar energéticamente los residuos forestales antes del proceso de torrefacción.
2. Evaluar las condiciones de operación del proceso de torrefacción de los residuos forestales.
3. Determinar los costos implicados en el proceso de torrefacción.

1. MARCO TEÓRICO

La biomasa se puede considerar como una fuente de energía solar almacenada por los seres vivos, en especial las plantas¹⁵ que por medio del proceso de fotosíntesis transforman el CO₂ y el vapor de agua del ambiente en glucosa; principal compuesto estructural de los almidones, celulosa, lignina, hemicelulosa, entre otros.¹⁶

Para generación energética, el uso de la biomasa se ha extendido como energía renovable debido a la problemática ambiental actual del uso excesivo de combustibles fósiles, la generación excesiva de gases de efecto invernadero, sin comentar la gran cantidad de residuos (industriales y domésticos) generados anualmente. El proceso de generación eléctrica con biomasa se puede considerar ecológicamente viable ya que las emisiones de CO₂ son nulas gracias a que se produce la misma cantidad de CO₂ que fue consumida por las plantas durante su crecimiento¹⁷.

- **Clasificación de la biomasa**

La Biomasa se clasifica en tres grandes grupos dependiendo de la fuente: la biomasa natural, los cultivos energéticos y la biomasa residual¹⁸. La biomasa Natural es aquella que se produce sin la intervención humana; un ejemplo de ella son las hojas que caen de los árboles por el cambio de estación o las ramas de los árboles que se caen naturalmente. Los cultivos energéticos son aquellos que están destinados única y exclusivamente para la producción de biocombustibles, por ejemplo cultivos de maíz para la generación de biodiesel. Por otro lado, se encuentra la Biomasa Residual que es un subproducto o residuo de diferentes actividades agrícolas, silvícolas, ganaderas, además de residuos de la industria agroalimentaria; por ejemplo la cascarilla de arroz, el bagazo de la caña o los excrementos de los animales.

¹⁵ ENDESA EDUCA. Centrales de Biomasa. 2014. [citado el día 05 de abril de 2016]. Disponible en: <http://www.endesaeduca.com/Endesa_educa/recursos-interactivos/produccion-de-electricidad/xiv.-las-centrales-de-biomasa >

¹⁶ RINCON, J, *et al.* Bioenergía: Fuentes, conversión y sustentabilidad. Bogotá, Colombia. 2014. Cap. 1, p. 22.

¹⁷ CONSORCIO ENERGETICO CORPOEMA. Formulación de un plan de desarrollo para las fuentes no convencionales de energía en Colombia (PFDNCE). Bogotá, Colombia. 2010. Vol. 2, p. 7-13. Disponible en: <http://www.upme.gov.co/Sigic/DocumentosF/Vol_2_Diagnostico_FNCE.pdf>

¹⁸ *Ibíd.*, p. 7-1 – 7-2.

La biomasa Residual a su vez se divide en 3 grupos: la biomasa residual forestal (BRF) que es generada en operaciones de limpieza o poda donde hay intervención del hombre, la biomasa residual agropecuaria que incluye la biomasa residual agrícola (residuos de procesos agrícolas relacionados con cultivos alimenticios) y la biomasa residual pecuaria (residuos de animales) y, como último, residuos sólidos urbanos (RSU) donde se incluyen todos los desechos de las ciudades y municipios que van a parar a rellenos sanitarios. En la Figura 1 se muestra la clasificación de la Biomasa.

Figura 1. Tipos de Biomasa

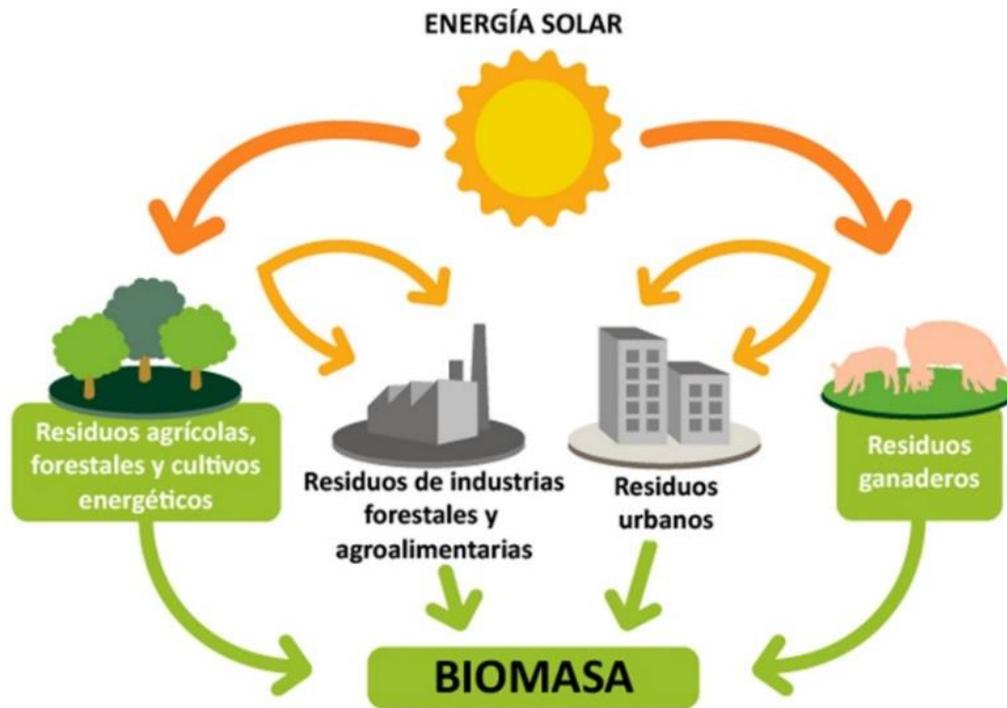


Fuente: ANÓNIMO. Energía de la Biomasa. [citado el día 14 de octubre de 2015]. Disponible en: <https://faeitch2012.wordpress.com/2012/03/19/energía-de-la-biomasa/>

A partir de estos tipos de biomásas se genera energía por medio de procesos termoquímicos (incluyen combustión, gasificación, entre otras), procesos bioquímicos (como la digestión aerobia y la digestión anaerobia) y procesos químicos (como la transesterificación).¹⁹ En la Figura 2 se muestra el ciclo de vida de la biomasa.

¹⁹ RINCON; *et al.* Op. cit., p. 27.

Figura 2. Ciclo de vida de la Biomasa



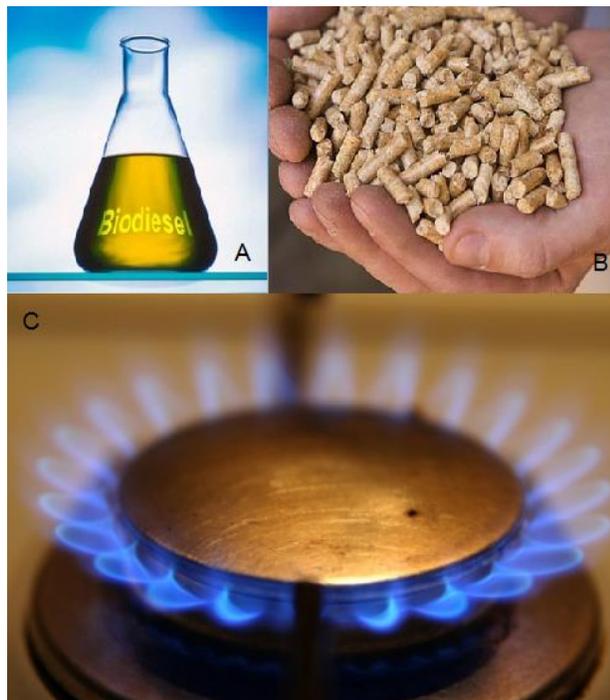
Fuente: Guillermo. Biomasa, ventajas e inconvenientes. [citado el día 14 de octubre de 2015].
Disponibile en: <<https://www.piselmoinmobiliaria.com/wp-content/uploads/2015/07/Biomasa3.jpg>>

- **Tipos de Biocombustibles**

Esta generación de energía se realiza por medio de la producción de un biocombustible que puede ser líquido, sólido o gaseoso.²⁰ Entre los combustibles líquidos se encuentran el bioetanol y el biodiesel; entre los combustibles sólidos se encuentra los pellets o briquetas, y entre los combustibles gaseosos se encuentra el biogás. Dependiendo del tipo de proceso que se le aplique a la biomasa se produce un biocombustible, y dependiendo del tipo de biomasa y las características físico-químicas que esta posea se escoge la tecnología. Los biocombustibles de interés para la temática a trabajar son los biocombustibles sólidos. En la Figura 3 se muestran los tres tipos de biocombustibles mencionados.

²⁰ Ibíd., Cap. 1, p. 20.

Figura 3. Tipos de Biocombustibles. A) Biocombustible Líquido. B) Biocombustible Sólido. C) Biocombustible Gaseoso.



Fuente: Elaboración propia²¹

Los combustibles sólidos para ser utilizados eficientemente para la generación de energía deben ser densificados, ya sea por unidad de volumen o unidad de energía. Para realizar la densificación energética existen diferentes procesos como la pelletización, briqueteo y torrefacción. De esta última no existen publicaciones a nivel nacional, razón por la cual se decide estudiar el proceso de torrefacción de biomasa residual forestal.

- **Torrefacción**

El proceso de torrefacción mejora las propiedades de la biomasa sólida que posteriormente sería utilizada como combustible. Este es un método de preparación de la biomasa para la generación energética que consiste en el

²¹ A) ECOTICIAS. [citado el día 14 de octubre de 2015]. Disponible en: <<http://www.ecoticias.com/biocombustibles/61317/Biodiesel-futuro-energetico>> B) ANÓNIMO. Pelletsaguaiz. [citado el día 14 de octubre de 2015]. Disponible en: <<http://www.alfambrinos.com/LaGuaiz/Contacto.html>> C) AHORROGASCO. Qué es el GLP. [citado el día 14 de octubre de 2015]. Disponible en: <<http://www.ahorrogas.cl/wp-content/uploads/que-es-el-glp.jpg>>.

calentamiento lento de la misma a temperaturas bajas (entre 200°C y 300°C)²² en medio de una atmósfera inerte lo que produce una transformación de la misma ya que este proceso disminuye el contenido de humedad y aumenta el poder calorífico²³ comparado con la biomasa inicial (cruda) lo que mejora el proceso de combustión y gasificación.

La biomasa torrefactada en el caso de combustión, se puede utilizar sola o en co-combustión con carbón mineral²⁴. La biomasa torrada o la mezcla carbón – biomasa torrada ingresan a una caldera donde es quemada produciendo energía en forma de calor; si se requiere producir energía eléctrica esta energía térmica en forma de vapor se hace pasar por una turbina y posteriormente por un transformador.²⁵ En la Figura 4 se muestra la biomasa torrada.

Figura 4. Biomasa torrefactada.



Fuente: ANÓNIMO. Qué es el pellet negro. [citado el día 14 de octubre de 2015]. Disponible en: <<http://www.forestalmaderero.com/articulos/item/que-es-el-pellet-negro.html>>

Entre las principales ventajas que se le atribuye al proceso de torrefacción según Clara Buriticá²⁶ son:

- ✓ Se obtiene una biomasa, como ya se explicó anteriormente, con un porcentaje bajo de humedad además de hidrofóbica que posee facilidad de almacenaje por largos periodos de tiempo.

²² RINCON; *et al.* Op. Cit., p. 27.

²³ CONSORCIO ENERGETICO CORPOEMA. Op. cit., p. 27.

²⁴ *Ibíd.*, p. 6-55.

²⁵ *Ibíd.*, p. pág. 6-58

²⁶ BURITICÁ, Clara, *et al.* Formulación De Instrumentos Técnicos Que Estimulen El Aprovechamiento De La Biomasa En La Generación De Energía a Partir De Fuentes no Convencionales De Energía – FNCE, Producto 2 Soporte Técnico y Jurídico Para El Aprovechamiento Energético De La Biomasa Residual En Colombia. UPME, Udistrital, Minambiente. 2015.

- ✓ El proceso de torrefacción reduce el trabajo de molienda y disminuye costos de acondicionamiento.
- ✓ Mejora las propiedades de la biomasa para ser utilizada como biocombustible
- ✓ Al comparar la biomasa torrefactada con el carbón, la primera posee un contenido de azufre despreciable y genera menor cantidad de cenizas que la segunda.
- ✓ La torrefacción es un proceso versátil, lo que indica que puede ser aplicable a dichas biomasa residual de baja calidad.

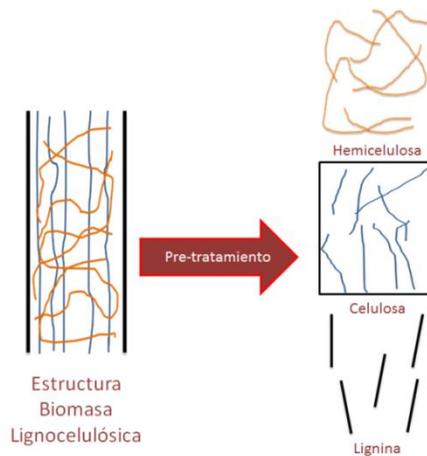
• **Componentes de la Biomasa Forestal**

Entre los principales componentes de la biomasa forestal se encuentra la celulosa (38 – 50%), la hemicelulosa (23 – 32%), la lignina (15 – 25%) y en una menor proporción se puede encontrar pectina, proteínas, compuestos extractivos y cenizas.²⁷

La fórmula molecular de la celulosa²⁸ es $(C_6H_{10}O_5)_n$, no es soluble en agua, posee una temperatura de descomposición entre 260 – 270°C. En la

Figura 5 se muestra la estructura de la biomasa lignocelulósica.

Figura 5. Estructura de la biomasa lignocelulósica.



Fuente: Lihle Mafu, Structural and chemical characteristics of selected torrefied biomass samples. IEA. 2014.

²⁷ RINCON; *et al.* Op. cit., p. 27.

²⁸ Datos tomados de "Center for Disease Control and Prevention. Cellulose. Disponible en línea en: <<http://www.cdc.gov/niosh/npg/npgd0110.html>> y Wikipedia, Cellulose Disponible en: <<https://en.wikipedia.org/wiki/Cellulose>>

- **Biomasa Forestales Residuales**

Entre las biomasa forestales más utilizadas industrialmente en el país se encuentran diferentes variedades de Pino, Eucaliptos, además de Teca, Nogal y Acacia.²⁹ Sin embargo las especies forestales de interés para el desarrollo del presente trabajo que fueron recolectadas en el JBB son: Ligustro, Jazmín australiano, Eucalipto, Pino y Acacia. La Tabla 1 reporta los poderes caloríficos de las especies mencionadas.

Tabla 1. Poder calorífico de algunas especies forestales

Especie	Nombre Científico	Poder Calorífico (Kcal/kg)
Ligustro	<i>Ligustrum lucidum</i>	Superior: 3.936 Inferior: 4.526
Jazmín Australiano	<i>Pittosporum Undulatum</i>	Superior: 4.095* Inferior: 4.685 *
Eucalipto	<i>Eucalyptus Sp</i>	Superior: 3.866 Inferior: 4.416***
Pino	<i>Pinus Sp</i>	Superior: 3.986 Inferior: 4.536***
Acacia	<i>Acacia Mangium</i>	Superior: 4.008 Inferior: 4.598**

Fuente: *OLIVEIRA, José María. MIT Portugal. Green Islands Spring Workshop. Mayo 2011, Boston USA.

**MOYA, Royer; TENORIO, Carolina. Fuelwood characteristics and its relation with extractives and chemical properties of ten fast-growth species in Costa Rica. ELSEVIER – Biomass and Bioenergy. Edición 56. Pág. 14 – 21. 2013

***Pérez, J; Osorio, L. Biomasa forestal como alternativa energética. Análisis silvicultural, técnico y financiero de proyectos. Medellín, Colombia. 2014. Universidad de Antioquia.

²⁹ PROEXPORT COLOMBIA. Sector Forestal en Colombia.2012. [citado el día 05 de noviembre de 2015] Disponible en: <http://www.inviertaencolombia.com.co/Adjuntos/Perfil_Forestal_2012.pdf>

2. CARACTERIZACIÓN ENERGÉTICA DE LOS RESIDUOS FORESTALES

La caracterización energética de los residuos forestales se realiza con el propósito de determinar las características en la que se encuentra la biomasa residual forestal (BRF) cruda inicialmente para evidenciar algún cambio, sea positivo, negativo o nulo, después de someterla al proceso de torrefacción.

La BRF caracterizada es una mezcla de especies forestales provenientes del Jardín Botánico de Bogotá (JBB), el cual realiza podas constantemente.

Se realiza una recolección de BRF durante todo el proceso experimental (4 meses), dentro del cual se establece inicialmente el tamaño de partícula para la etapa de torrefacción bajo diferentes temperaturas y tiempos de residencia. La última etapa experimental corresponde a la validación de las condiciones de operación definidas.

Dado lo anterior, a continuación se describe la caracterización realizada a la BR durante las tres etapas mencionadas.

2.1 ADECUACIÓN DE LA BIOMASA RESIDUAL

La biomasa residual (BR) utilizada para las etapas de torrefacción mencionadas, se compone de las siguientes especies forestales, a la izquierda su nombre científico y a la derecha el nombre común.

- *Ligustrum lucidum* = Ligustro
- *Pittosporum undulatum* = Jazmín australiano
- *Eucalyptus Sp* = Eucalipto
- *Pinus Sp* = Pino
- *Acacia Mangium* = Acacia

De acuerdo a los valores de poder calorífico de las anteriores especies registrados en el marco teórico del documento de 3.936, 4.095, 3.866, 3.986, y 4.008 Kcal/kg en el mismo orden nombrado, y cuyo porcentaje de diferencia entre el valor más grande y el más pequeño es de 5,7% (ver Ecuación 1), se decide trabajar todas como una sola muestra, sin distinción alguna. La razón de que sus poderes caloríficos sean similares se debe a la composición promedio de la madera que también fue descrita en el marco teórico.

Ecuación 1. Cálculo porcentaje de diferencia entre datos

$$\%D = \frac{|valor1 - valor2|}{(valor1 + valor2)/2} \times 100$$

Reemplazando en la Ecuación 1 los valores de poder calorífico de la especie con menor y mayor valor, se obtiene:

$$\%D = \frac{|3.866 - 4.095|}{(3.866 + 4.095)/2} \times 100 = 5,75\%$$

La BRF procedente del JBB presenta un color amarillo quemado, y olor a tronco húmedo. La Figura 6 representa la BR recogida en el Jardín Botánico, esta se encuentra chipeada y fue podada dos días antes a su recolección.

Figura 6. Biomasa residual para recolección en el Jardín Botánico de Bogotá



La adecuación de las muestras para someterlas al proceso de torrefacción se realiza en las instalaciones de Industrias Tecsol Ltda.; tal adecuación implica una homogenización en troncos y en tamaño de partícula así:

2.1.1 Homogenización de los residuos forestales en troncos. La Biomasa residual recolectada en el JBB y transportada a las instalaciones de Tecsol Ltda contiene hojas, ramas y troncos (ver Figura 7); con el fin de realizar un estudio preciso, solo se selecciona la madera del tronco, la cual corresponde a la parte sólida ubicada debajo de la corteza exterior; la composición promedio de esta madera es: celulosa, 38-50%, hemicelulosa, 23-32% lignina, 15-25% y aproximadamente un 5% de otros compuestos como extractivos³⁰. A continuación los datos registrados en la Tabla 2 evidencian la diferencia en los porcentajes de celulosa, hemicelulosa, y lignina, cuyos poderes caloríficos promedio (BS) son: 17 MJ/kg, 16,63 MJ/kg y 21,13 MJ/kg respectivamente³¹.

³⁰ RINCON; *et al.* Op. cit., p. 27.

³¹ MURPHY, W. K. y MASTERS, K. R. Gross heat of combustion of northern red oak (*Quercus rubra*) chemical components. 1978. *Wood Sci.* 10:139-141.

Tabla 2. Composición química de las partes del árbol encontradas en la recolección de biomasa

Parte del árbol	Celulosa (%)	Hemicelulosa (%)	Lignina (%)	Extractivos (%)
Madera del tronco	40,7*	26,9*	27,0*	5,0*
Corteza	22,2*	8,1*	13,1*	25,2*
Ramas	32,0*	32,0*	21,0*	16,6*
Hojas	18,1**	NA	14,7**	33,0*

Fuente: * RÄISÄNEN, Tommi y ATHANASSIADIS, Dimitris. Basic chemical composition of the biomass components of pine, spruce and birch [en línea]. Botnia- Atlántica: forest refine, enero 2013 [citado el 15 de Abril de 2016] Disponible en internet:

<http://www.biofuelregion.se/UserFiles/file/Forest%20Refine/1_2_IS_2013-01-31_Basic_chemical_composition.pdf >

**REUNIÓN CIENTÍFICA DE LA SEEP. (XLV: 30-3, de Mayo- Junio, 2005: Gijón, España). Determinación de lignina y celulosa en hojas de plantas leñosas mediante NIRS: comparación de métodos estadísticos. Instituto nacional de investigación y tecnología agraria y alimentaria. Gijón. 2005. 8 p.

La separación de la madera del tronco no se hace dispendiosa debido a que directamente en el JBB la biomasa residual pasa por un proceso de chipeado, en el cual las hojas y las ramas son separadas casi en su totalidad, el chipeado es un proceso de adecuación de la BR.

Figura 7. Biomasa Residual llevada a Tecsol Ltda para estudio



2.1.2 Homogenización de los residuos forestales en tamaño de partícula. La homogenización en tamaños de partícula significa separar la BRF en diferentes grupos, cada uno con un tamaño diferente. Esto se realiza con el fin de evaluar el mejor tamaño de partícula durante el proceso de torrefacción.

A partir de la BR mostrada en la Figura 7, se separa manualmente los troncos grandes y medianos, en donde la denominación de tronco grande se le da al trozo con las mayores dimensiones promedio encontradas, es decir 0,62 cm, 6,58 cm y 1,87 cm y, bajo el mismo criterio se le da el nombre de tronco mediano a la biomasa cuyas dimensiones son de 0,56 cm, 3,44 cm y 1,84 cm de alto, largo y ancho respectivamente. En la Figura 8 se observa los dos tamaños de partícula identificados hasta el momento, estos se almacenan en bandejas diferentes.

Figura 8. Tamaños de partícula identificados: bandeja 10 (trozos medianos, izquierda), bandeja 3 (trozos grandes, derecha)



Después de la separación mencionada, la biomasa sobrante se somete a la operación de tamizado con un tiempo de 30 minutos para clasificar de forma más precisa los tamaños de partícula, se utilizan diferentes mallas, de donde se seleccionan las mallas en las cuales queda retenida una muestra de por lo menos 110 g, valor que corresponde a la cantidad de biomasa necesaria para llevar a cabo la experimentación, estas fueron: malla 18, malla 20 y finos.

La biomasa obtenida en la malla 10 corresponde a la bandeja 11, es decir que esta BR posee un tamaño de partícula mayor a este número de malla y menor a la muestra contenida en la bandeja 10, es decir, 0,25 cm, 2,29 cm y 1,10 cm de alto, largo y ancho respectivamente. En la Figura 9 se observa la clasificación de los diferentes tamaños de partícula luego de realizar la operación de tamizado.

Figura 9. Mallas resultantes después de tamizar



En la Tabla 3 se reportan las medidas promedio de la BR separada en las bandejas 3, 10 y 11 y fueron obtenidas de tomar las medidas de una muestra significativa de toda la población.

Tabla 3. Medidas promedio de los tamaños de partícula identificados

Bandeja	Alto (cm)	Largo (cm)	Ancho (cm)
B11	0,25	2,29	1,10
B10	0,56	3,44	1,84
B3	0,62	6,58	1,87

De forma similar, la Tabla 4 registra la medida de las mallas seleccionadas después de la operación de tamizado, vale aclarar que estas medidas corresponden al tamaño de partícula promedio de la BRF que quedó en dicha malla.

Tabla 4. Medida de las mallas utilizadas en la operación de tamizado

Malla	medida (cm)
M18	0,100076
M20	0,084074
Finos	< 0,084074

El proceso de homogenización permitió identificar seis (6) tamaños de partícula, B11, B10, B3, M18, M20 y finos, los cuales se muestran en la Tabla 3 y la Tabla 4, con ellos se lleva a cabo la primera etapa de experimentación que corresponde a la determinación de tamaño de partícula que se explica en el Capítulo 3 de este documento.

2.2 ANÁLISIS DE CARACTERIZACIÓN

El análisis de caracterización de la BR cruda se realiza tomando una muestra de 1 kg que incluye los diferentes tamaños de partícula identificados a la cual se le calcula la humedad y poder calorífico en un laboratorio especializado. La muestra es previamente secada en un horno a 105°C durante 24 horas, luego se almacena en una bolsa hermética y se envía para su análisis³².

³²Metodología tomada de: BYEONG-II, Na.; AHN, Byoung-Jun. y LEE, J ae-Won. Changes in chemical and physical properties of yellow poplar (*Liriodendron tulipifera*) during torrefaction. Berlin. Springer-Verlag, 2014. DOI 10.1007/s00226-014-0697-1

Al mismo tiempo se determina la humedad individual de los tamaños de partícula separados con el fin de tener un registro y poder comparar estos resultados con la humedad calculada una vez sea torrefactada.

2.2.1 Poder Calorífico. El poder calorífico es la propiedad energética de mayor consideración en el análisis de datos de la BR sometida al proceso de torrefacción. El valor de esta propiedad entrega información sobre la cantidad de energía por unidad de masa o unidad de volumen de BR desprendida en la reacción de combustión, es decir, entre mayor sea este valor, como mejor combustible se comporta.

En el Anexo A se encuentra el registro de los valores de poder calorífico de la muestra de BR cruda enviada al Laboratorio Interlabco S.A.S. La muestra reporta valores de PC cómo se recibe y en base seca de 3.763 Kcal/Kg y 4.045 Kcal/Kg respectivamente. Además, el anexo entrega información sobre el método seguido por dicho laboratorio para el cálculo de esta propiedad, el cual corresponde a la ASTM D5865- 11a.

2.2.2 Contenido de Humedad. El contenido de humedad de la BR es otra propiedad energética de consideración en el análisis de datos, si bien, entre menor sea el contenido de humedad, mayor será el aprovechamiento de la BR para transporte, favorece la combustión para su posterior uso en generación de bioenergía.

El porcentaje de humedad total también es reportado en el Anexo A y tiene un valor de 6,98% (como se recibe la BR), y fue determinado bajo el método ASTM D3302/D3302 M-12. Es pertinente mencionar nuevamente que la biomasa fue secada a 105°C durante 24 horas antes de enviarse al laboratorio para el análisis.

Adicionalmente, se calculan las humedades para cada tamaño de partícula identificado, la humedad en base seca se calcula utilizando la muestra secada al ambiente inicialmente, y posterior secado en un horno durante 24 horas a 105 °C. Posteriormente se utiliza el equipo de TGA, el cual se programa para que alcance 110 °C, temperatura a la cual se retira la humedad de la biomasa³³. Los valores de humedad son calculados de acuerdo a la Ecuación 2 y se reportan en la Tabla 5.

Ecuación 2. Cálculo de porcentaje de humedad

$$\%H = \frac{W_o - W_i}{W_o} * 100$$

³³ AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. Standard Test Methods for Proximate Analysis of Coal and Coke by Macro Thermogravimetric Analysis. ASTM D7582, Pensilvania, 2012. 9p.

En donde: W_o = masa de la biomasa inicial

W_i = masa de la biomasa después del secado a 110°C

Tabla 5. Humedades calculadas con análisis termogravimétrico

Tamaño de partícula	H (%)
B11	2,53
B10	2,86
B3	3,76
M18	3,95
M20	4,27
finos	3,52

Una vez reportadas las características físicas (color, olor y aspecto) y químicas (poder calorífico y humedad) de la biomasa residual cruda se completa en su totalidad la caracterización energética de los residuos forestales antes del proceso de torrefacción.

2.3 SELECCIÓN DE MUESTRAS Y EQUIPOS

A continuación se pondrá en conocimiento los equipos que se utilizan para la torrefacción, y el análisis termogravimétrico, además, el método de selección de muestras para los ensayos de torrefacción.

2.3.1 Equipos. Para llevar a cabo las etapas de experimentación y lograr evaluar las condiciones de operación del proceso de torrefacción son necesarios dos equipos principalmente: un horno rotatorio a escala laboratorio en donde se realiza el proceso de torrefacción, y un equipo de TGA para análisis termogravimétrico de la biomasa torrefactada.

Por otro lado, para la validación de las condiciones de operación del proceso de torrefacción y la identificación de los costos involucrados en éste es necesario un horno rotatorio a nivel planta piloto.

A continuación se entregan los detalles de cada uno de los equipos:

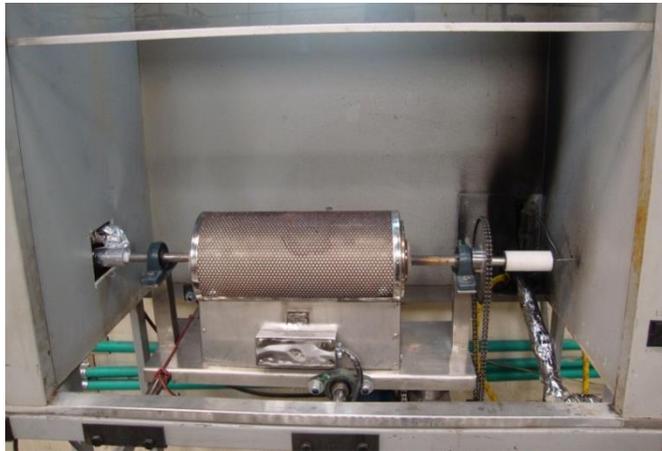
- Horno rotatorio a nivel laboratorio: horno rotatorio horizontal, dotado de una resistencia tipo mufla de 4,8 kW aislada mediante una capa de cemento refractario de 10 cm de espesor con capacidad de calentamiento hasta 900°C, de 35 cm de largo y 10 cm de diámetro interno, en el interior se coloca la retorta en acero inoxidable 304 de 16 cm de larga y 1½” de diámetro en su parte central, y con niples de tubería de acero inoxidable 304 de ½” y 41 cm de largo en un extremo y 25 cm en el otro , que sirven de ejes a la retorta para conectarla al sistema de rotación que está conformado por un sistema de

piñones, reductor y motor para que la retorta gira a 4 RPM, además se utilizan para cargar el material, alimentar los gases de activación y evacuar los gases generados en la activación.

La retorta está conectada por su ducto de entrada a la línea de gases a través de la cual se alimenta N_2 , debido que esta es la atmósfera a la que se torrefacta.

Este horno cuenta con un sistema de control de temperatura que permite programar la velocidad de calentamiento, con tiempos de residencia variables a diferentes temperaturas y temperatura final. En la Figura 10 se muestra el horno rotatorio utilizado.

Figura 10. Horno rotatorio de torrefacción



- Equipo de TGA: el equipo de Análisis Termo Gravimétrico o TGA por sus siglas en inglés (Thermo Gravimetric Analysis) es un equipo destinado a hallar, experimentalmente, valores de propiedades físicas o químicas de distintos materiales. El equipo termogravimétrico evalúa los cambios en la masa de una muestra de biomasa durante una variación controlada de temperatura (a una velocidad de calentamiento constante), en función del tiempo, el TGA está conformado por un sistema de control, en el cual se programa la Temperatura deseada dependiendo el análisis que se va a realizar, ya sea humedad, volátiles o cenizas, este TGA tiene una capacidad de calentamiento hasta $1000^{\circ}C$, además posee un sistema de alimentación de gases, que garantiza la atmósfera requerida de acuerdo al análisis. (Ver Figura 11)

Figura 11. Equipo termogravimétrico



- Horno rotatorio a nivel planta piloto: Horno rotatorio horizontal de 7,5 m de largo, con un diámetro interno de 0,51 m, y fabricado en material lamina HR (hot rolled), 1 pulgada. Compuesto por sistema de rodamiento que permite 7,5 rpm, y un quemador. Su inclinación depende del tiempo de residencia necesario para llevar a cabo la torrefacción. Además, tiene un recubrimiento de fibra cerámica para evitar que el calor se disipe. Funciona con un motor de 24 v y como combustible se utiliza gas natural. (Ver Figura 12). En este horno se lleva a cabo la validación de las condiciones de operación encontradas a nivel laboratorio, y a partir de esto se determinan los costos involucrados en el proceso.

Figura 12. Horno rotatorio de torrefacción a nivel planta piloto



2.3.2 Selección de Muestras. Se realiza una selección de muestras aleatoria para cada una de las tres etapas experimentales, determinación tamaño de partícula, determinación temperatura y tiempo de residencia, y validación de las condiciones ideales para el proceso de torrefacción.

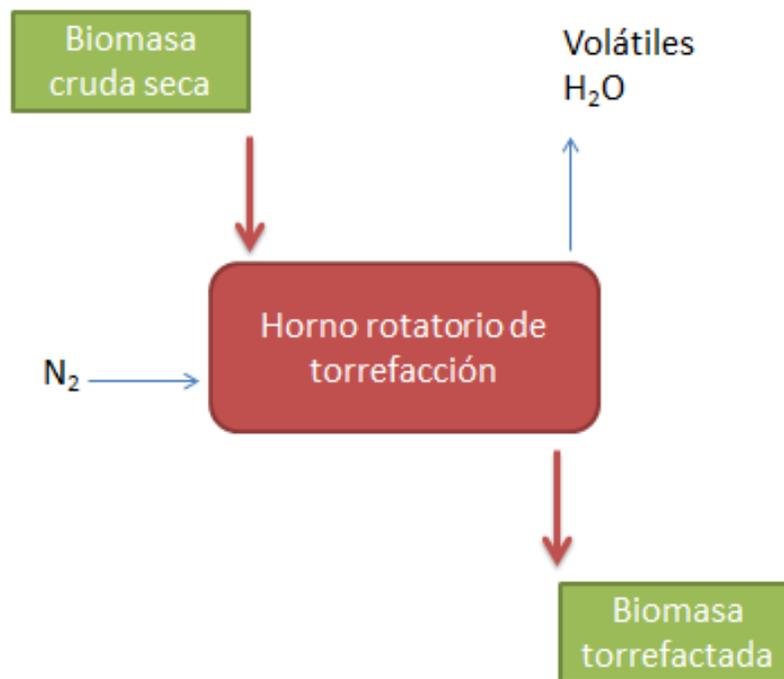
El proceso de torrefacción consiste en pesar 5 gramos de biomasa que es la cantidad adecuada para el tamaño del horno rotatorio y lograr una mayor transferencia de calor, la muestra se coloca en la retorta que se monta en el interior del horno y posteriormente se conecta al sistema de rotación que hace girar la retorta e iniciar el calentamiento de acuerdo a la rampa seleccionada. Adicionalmente se conecta nitrógeno para garantizar una atmósfera inerte al momento de torrefactar.

Ahora, de cada muestra torrefactada se toma un gramo para realizar el análisis termogravimétrico correspondiente.

Para el procedimiento de validación en el horno rotatorio a nivel planta piloto, la cantidad de muestra necesaria es de 52 kilos, esta biomasa tiene el tamaño de partícula seleccionado, y ha sido secada al ambiente durante varios días.

Para el completo entendimiento del lector a continuación se presenta el diagrama correspondiente al proceso de torrefacción (ver Figura 13).

Figura 13. Esquema simplificado del proceso de torrefacción



Entregada la información pertinente sobre los equipos que se utilizan en el proceso de torrefacción y la selección de muestras, se procede a evaluar las mejores condiciones de operación para el proceso de torrefacción.

3. CONDICIONES IDEALES DE OPERACIÓN

La torrefacción de BRF es un proceso de densificación energética que no ha sido utilizado y estudiado en Colombia, por esta razón es necesario recurrir a la literatura extranjera donde los experimentos reportados se han realizado a condiciones diferentes, empezando por la biomasa residual utilizada.

Dado lo anterior se parte con una primera etapa de experimentación en donde se torrefacta los seis tamaños de partículas identificados a una temperatura y tiempo de residencia específico con el fin de establecer el tamaño de partícula apropiado para la segunda etapa de torrefacción, la cual se realiza a diferentes temperaturas y tiempos de residencia, a nivel laboratorio, como se describe en este capítulo. Se incluye además una tercera etapa de experimentación donde se torrefacta a nivel planta piloto con las condiciones ideales encontradas (tamaño de partícula, T y t).

El Cuadro 1 resume las etapas de experimentación, estas incluyen las variables a encontrar, el número de réplicas y los análisis realizados para determinar las mejores condiciones para el proceso de torrefacción de BR.

Cuadro 1. Resumen de los análisis a realizar para encontrar las mejores condiciones de torrefacción

Etapa de Experimentación	Finalidad	Número de réplicas	Analizando
Primera Etapa	Encontrar Tamaño de partícula con T y t fijos a nivel laboratorio	2	Pendientes de caída de las curvas de TGA
			% Humedad
Segunda Etapa	Encontrar Tiempo de Residencia con tamaño de partícula fijo a nivel laboratorio	1	% Humedad
			% Cenizas
	Encontrar Temperatura de torrefacción con tamaño de partícula fijo a nivel laboratorio		Hidrofobicidad
			Poder Calorífico
Tercera Etapa	Validación a nivel planta piloto del tamaño de partícula, tiempo de residencia y temperatura de torrefacción encontrados en la primera y segunda etapa.	1	% Humedad
			% Cenizas
			Hidrofobicidad
			Poder Calorífico

Se escoge el tamaño de partícula, el tiempo de residencia y la temperatura de torrefacción como variables de estudio para el proceso, dado que éstas se consideran importantes para determinar las mejores condiciones de operación y la posterior transformación de la BR cruda; además dichas variables son las analizadas para encontrar la mejor combinación durante la torrefacción y analizar si se logra un aumento de las propiedades energéticas de los residuos forestales.

3.1 DETERMINACIÓN TAMAÑO DE PARTÍCULA

La determinación de tamaño de partícula permite fijar una de las tres variables consideradas importantes en el proceso de torrefacción de la biomasa residual. El tamaño de partícula se define por medio de la metodología de Multicriterios Ponderados, la cual se describe en el numeral 3.1.3.

3.1.1 Primera etapa de torrefacción. En el primer Capítulo del presente documento se seleccionaron seis diferentes tamaños de partícula (B11, B10, B3, M18, M20 y finos), los cuales se someten al proceso de torrefacción a una temperatura promedio de 250°C(*), un tiempo de calentamiento de 40 minutos(**) y de sostenimiento o residencia de 30 minutos³⁴, estos parámetros se fijan teniendo en cuenta la literatura.

La biomasa es colocada en un horno rotatorio, equipado con una termocupla para verificar la temperatura interna, además, un sistema de programación para definir los tiempos de calentamiento y sostenimiento utilizando una temperatura set point. La biomasa es torrefactada bajo condiciones anaeróbicas, con una alimentación de nitrógeno al horno con un flujo mínimo. Finalizados los 30 minutos de torrefacción se apaga el horno y se descarga la biomasa que es pesada y almacenada en bolsas herméticas.

Se realiza dos réplicas para cada tamaño de partícula, teniendo como resultado 18 experimentos, este número se obtiene a partir de la Ecuación 3, que para este caso n es 6 (tamaños de partícula definidos en la Tabla 3 y Tabla 4) y f, 1 (solo se estudia el tamaño de partícula).

Ecuación 3. Calculo de número de ejecuciones

$$E = n^f$$

(*)La temperatura se selecciona de acuerdo a un promedio entre extremos de torrefacción (de 230°C a 280°C) tomados del artículo: BYEONG-IL, Na; BYOUNG-JUN, Ahn y JAE-WON, Lee. Changes in chemical and physical properties of yellow poplar (*Liriodendron tulipifera*) during torrefaction. 18 de diciembre de 2014.

(**)Determinado por la inercia térmica del horno de torrefacción.

³⁴ PHANPHANICH, Manunya y MANI, Sudhagar. Impact of torrefaction on the grindability and fuel characteristics of forest biomass. vol. 102, p. Disponible en: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S096085241001388X>>.

Donde n = número de niveles
 f = número de variables

De la Figura 14 a la Figura 19 se observa la biomasa torrefactada resultante de los tres ensayos realizados.

Figura 14. Biomasa torrefactada proveniente de la bandeja 11



Figura 15. Biomasa torrefactada proveniente de la bandeja 10



Figura 16. Biomasa torrefactada proveniente de la bandeja 3



Figura 17. Biomasa torrefactada proveniente de la malla 18



Figura 18. Biomasa torrefacta proveniente de la malla 20



Figura 19. Biomasa torrefactada proveniente de finos



Se observa luego del proceso un cambio en el color de la biomasa cruda, el material torrefactado se torna café - marrón.

3.1.2 Pruebas de TGA y humedad. Las pruebas termogravimétricas en el TGA se realiza una por cada muestra torrefactada, aquí se obtienen datos de temperatura, pérdida de masa y tiempo con los cuales se elabora curvas de Temperatura vs. tiempo, masa vs. Temperatura y masa vs. tiempo.

La razón por la que se realiza dos réplicas para cada ensayo se debe a que la estructura en la que está montado el TGA es bastante inestable, y un movimiento brusco provoca un vaivén en el alambre que soporta la copa en donde está la muestra de BR haciendo que la lectura de masa varíe significativamente.

La temperatura del TGA se programa a 400°C, en donde se evidencia la reacción de pirolisis a aproximadamente 380°C y una caída brusca de masa. Alcanzada la temperatura de 400°C el TGA se apaga y se deja enfriar durante 6 horas, la muestra se retira y se almacena en bolsas herméticas. De la Figura 20 a la Figura 25 se muestra la biomasa luego de pasar por el equipo termogravimétrico.

Figura 20. TGA para la bandeja 11 (izquierda primer ensayo, centro, duplicado, derecha triplicado)



Figura 21. TGA para la bandeja 10 (izquierda primer ensayo, centro, duplicado, derecha triplicado)



Figura 22. TGA para la bandeja 3 (izquierda primer ensayo, centro, duplicado, derecha triplicado)



Figura 23. TGA para la malla 18 (izquierda primer ensayo, centro, duplicado, derecha triplicado)



Figura 24. TGA para la malla 20 (izquierda primer ensayo, centro, duplicado, derecha triplicado)



Figura 25. TGA para finos (izquierda primer ensayo, centro, duplicado, derecha triplicado)



3.1.2.1 Curvas por TGA. El TGA tiene dos lectores, uno de temperatura y otro de masa, ambos están conectados a un ordenador, el cual recibe datos cada 30 segundos y los guarda, a partir de estos datos se elaboran las curvas de temperatura vs tiempo y masa vs tiempo para las tres muestras torrefactadas por cada tamaño de partícula.

Anteriormente se mencionó que la estructura en donde se encuentra el equipo de análisis termogravimétrico es inestable, razón por la que durante la primera replica la mayoría de las curvas presentaron un comportamiento diferente y que es asociado a las vibraciones causada por las herramientas utilizadas durante una adecuación de la bodega (lugar de ubicación del TGA), lo que afectó los datos arrojados por el equipo. En la segunda réplica se garantizó que esto no sucediera y se obtuvo curvas cuyo comportamiento presentaron la misma tendencia.

Con base en lo anterior, se toma en cuenta solo las dos curvas de TGA en las cuales se presenta una similitud en los datos obtenidos.

La similitud entre curvas se encuentra utilizando la desviación de la raíz cuadrada media (por sus siglas en ingles RMSD “Root-mean-square deviation”) que se representa con la siguiente ecuación:³⁵ (Ver Ecuación 4)

Ecuación 4. Cálculo del RMSD

$$RMSD = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i^{exp1} - x_i^{exp2})^2}$$

Dónde n representa el número de datos, x representa la variable que se va a evaluar y, $exp1$ y $exp2$ representan los dos datos de la variable escogida.

Para la curva de temperatura vs. tiempo (donde se compara la variable T) y para masa vs. tiempo (comparación de variable masa) se muestra a continuación: (Ver Tabla 6)

Tabla 6. RMSD para las curvas de TGA

Tamaño de partícula	RMSD(*) Temperatura	RMSD(*) Masa
Bandeja 11	8,2	0,03
Bandeja 10	9,4	0,12
Bandeja 3	17,2	0,03
Malla 18	9,1	0,02
Malla 20	11,6	0,07
Finos	6,3	0,03

Nota: (*) valores adimensionales

Se observa que las curvas son similares para cada tamaño de partícula debido al bajo valor de RMSD obtenido por variable.

A continuación (del Gráfico 1 al Gráfico 6) se muestra las dos curvas tenidas en cuenta, cuyo comportamiento durante el calentamiento y la pérdida de masa presentan la misma tendencia.

³⁵ SHAWAQFEH, Ahmad. Isobaric Vapor–liquid equilibrium for the binary system Diisopropylether + Isopropanol at 95 kPa. 2010.

Gráfico 1. Comparativo de TGA con torrefactados de la bandeja 11

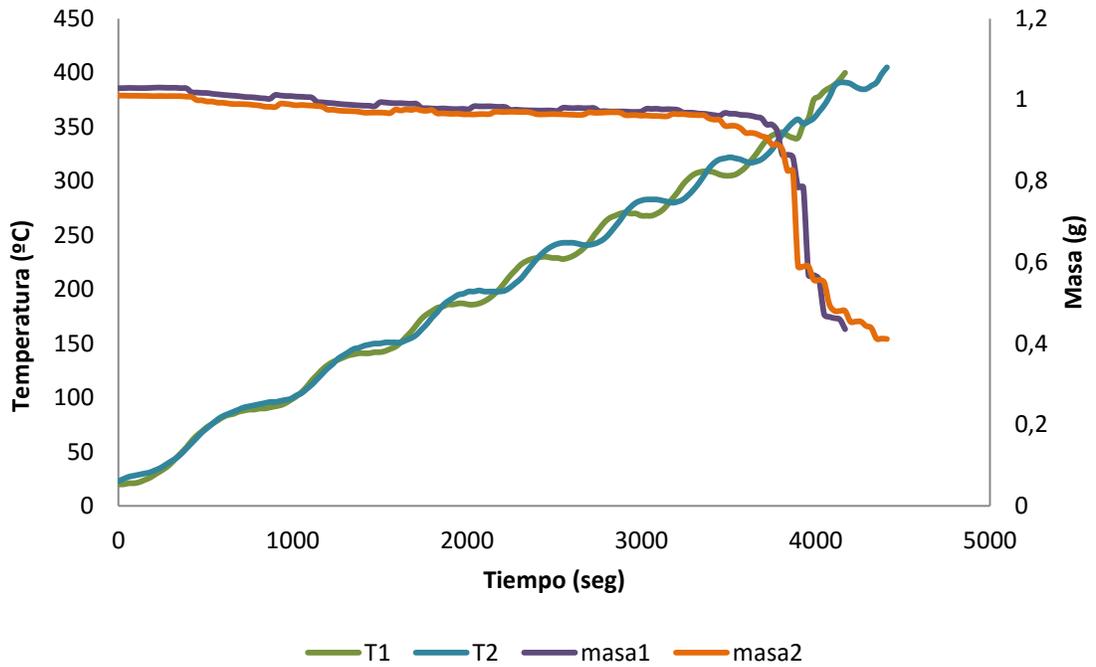


Gráfico 2. Comparativo de TGA con torrefactados de la bandeja 10

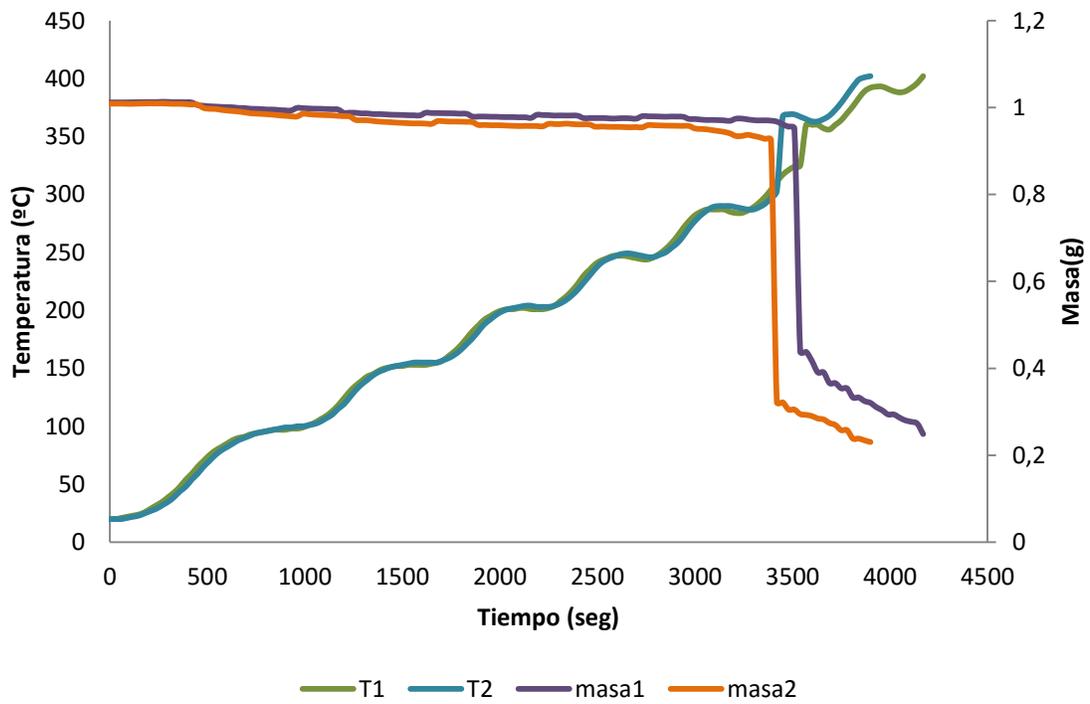


Gráfico 3. Comparativo de TGA con torrefactados de la bandeja 3

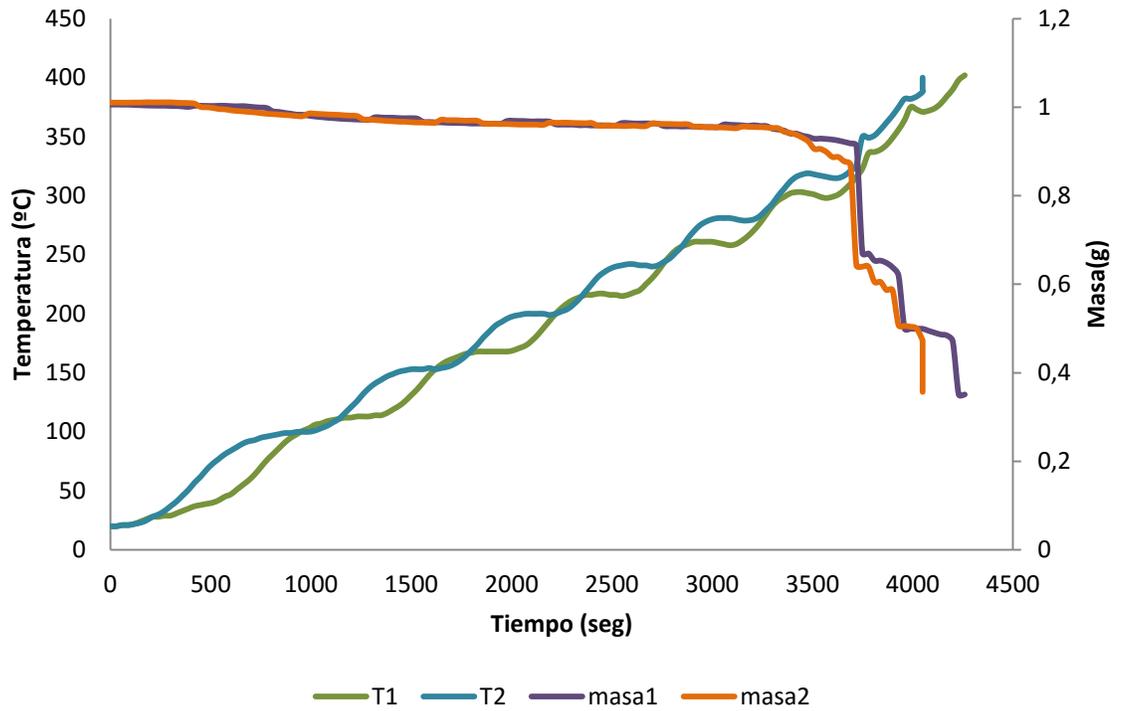


Gráfico 4. Comparativo de TGA con torrefactados de la malla 18

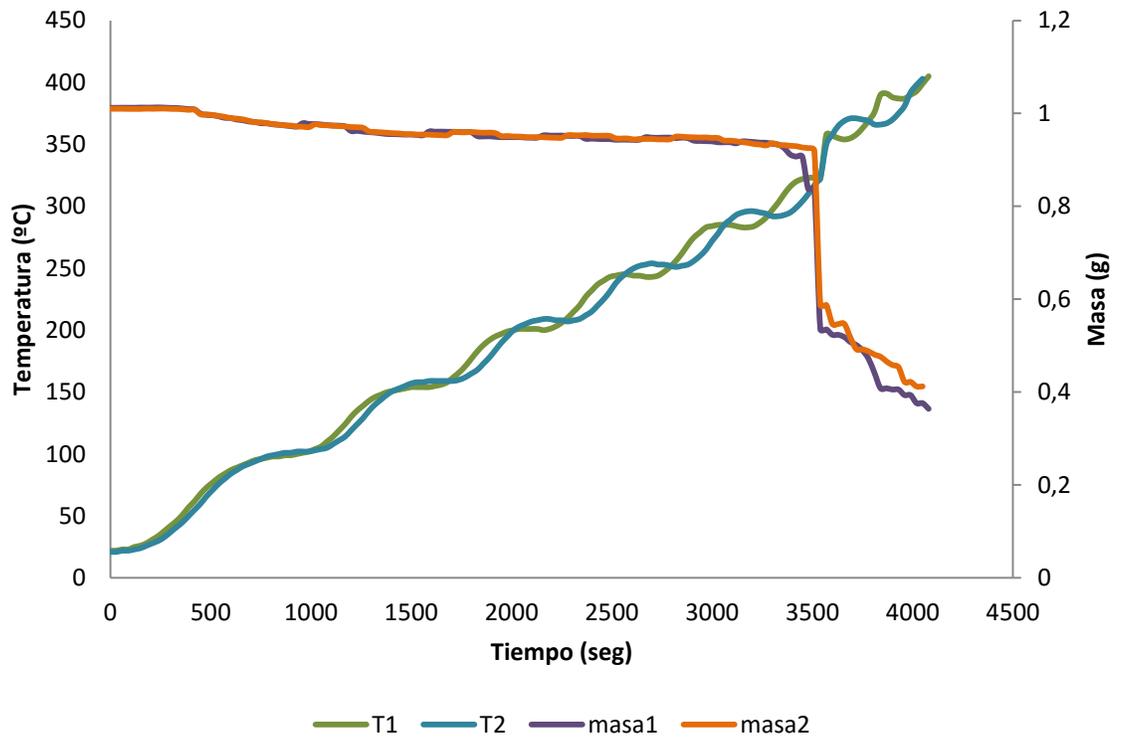


Gráfico 5. Comparativo de TGA con torrefactados de la malla 20

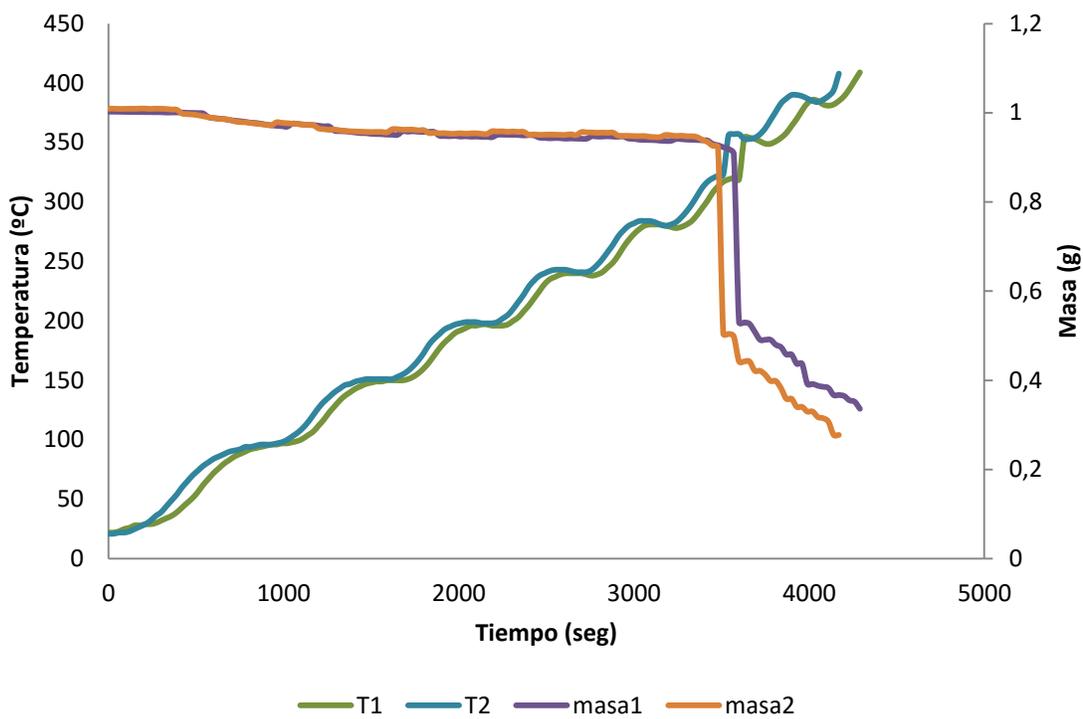
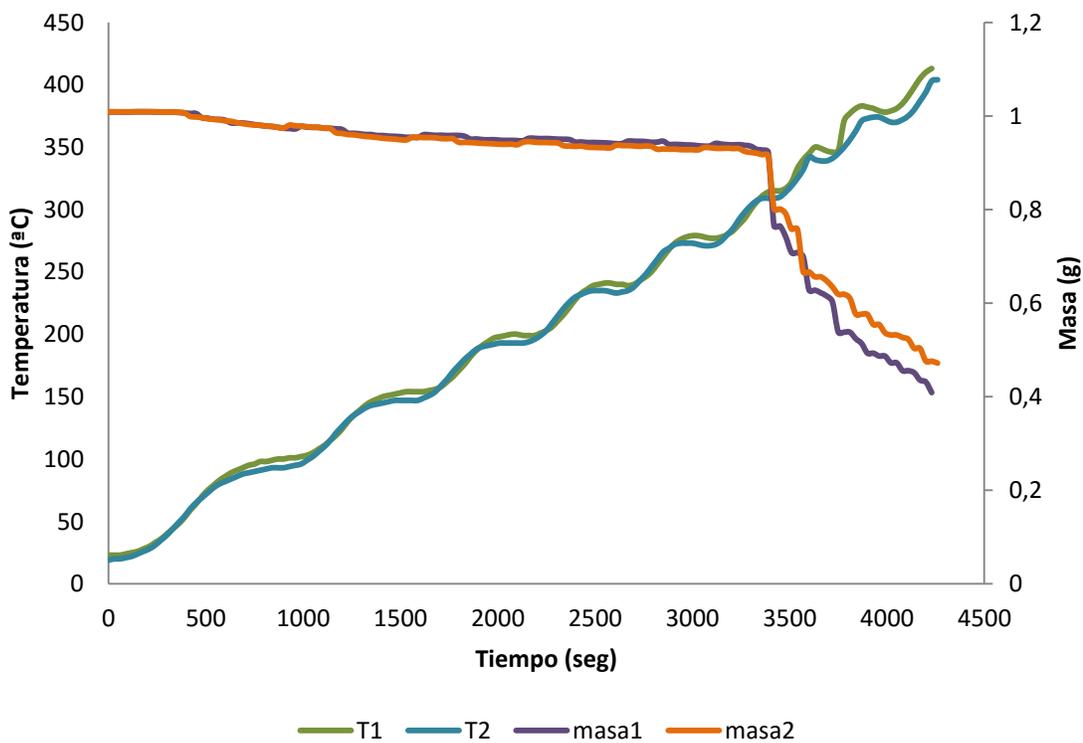


Gráfico 6. Comparativo de TGA con torrefactados de fondos



A partir de los gráficos presentados para cada tamaño de partícula, se calcula un promedio aritmético con las curvas que presentan la misma tendencia, y se toman estos datos como una sola curva para el proceso de priorización.

3.1.2.2 Contenido de humedad. Se mencionó que algunas de las características específicas de la biomasa residual cruda es su alto contenido de humedad (ver Introducción). En la Tabla 7 se reporta la humedad de la biomasa residual cruda y la biomasa residual torrefactada, a partir de estos valores se observa que el proceso de torrefacción funciona como un tratamiento térmico para eliminar humedad en la mayoría de los ensayos a casi la mitad e incluso por encima. Estos datos se calculan con la Ecuación 2 en el numeral 2.2.2.

Tabla 7. Registro de Humedades de la BR cruda y la BR torrefactada

tamaño de partícula	% Humedad		% pérdida de agua
	BR cruda	BR torrefactada	
B11	2,53	0,73	71,15
B10	2,86	0,66	76,92
B3	3,76	1,64	56,41
M18	3,95	2,25	42,91
M20	4,27	2,26	46,99
FINOS	3,52	2,26	35,72

3.1.3 Matriz de multicriterios ponderados para tamaño de partícula. El objetivo de este numeral es seleccionar el tamaño de partícula adecuado para el proceso de torrefacción, con el fin de continuar a la segunda etapa de experimentación, en donde el tamaño de partícula escogido se torrefacta bajo diferentes temperaturas y tiempos de residencia. La priorización para el tamaño de partícula se realiza utilizando la metodología de Multicriterios Ponderados³⁶, la cual se aplica cuando se tiene que tomar decisiones de selección respecto a un número finito de alternativas.

A continuación se exponen los criterios de priorización, los cuales fueron de tipo experimental. El Cuadro 2 presenta los criterios definidos y aceptados para la priorización, resultado de la discusión entre el director, y las estudiantes autoras del proyecto.

³⁶ La metodología de Multicriterios ponderados se trabajó en el proyecto: BURITICÁ, Clara, *et al.* Formulación De Instrumentos Técnicos Que Estimulen El Aprovechamiento De La Biomasa En La Generación De Energía a Partir De Fuentes no Convencionales De Energía – FNCE, Producto 2 Soporte Técnico y Jurídico Para El Aprovechamiento Energético De La Biomasa Residual En Colombia. UPME, Udistrital, Minambiente. 2015.

Cuadro 2. Criterios de priorización

Criterio	Unidades (%)	Justificación
Incremento de la temperatura a través del tiempo	Porcentaje	Comportamiento evidenciable con los datos arrojados por el TGA
Cambio de la masa de la biomasa con el incremento de temperatura	Porcentaje	Comportamiento evidenciable con los datos arrojados por el TGA,
Caída de la masa de la biomasa a través del tiempo	Porcentaje	Comportamiento evidenciable con los datos arrojados por el TGA
Contenido de Humedad	Porcentaje	Calculado a partir de los datos arrojados por el TGA

La metodología de Multicriterios Ponderados se desarrolla en 4 pasos principales: la definición de criterios, la documentación de criterios, la valoración de los criterios y la priorización.

Para homogeneizar rangos de valores de los diferentes criterios de evaluación y llevarlos a una escala comparable, para cada uno de los criterios de priorización, se asigna 1 al valor más relevante y 0 al de menor relevancia, a partir de los cuales se desarrolla una función de transformación con el fin de homogeneizar valores que se obtienen a partir de una interpolación de los valores.

Una vez definidos los criterios, se procede a establecer su valor y peso y se obtiene la calificación de los criterios establecidos en el análisis mediante la multiplicación del peso por el valor. La calificación (Ct) es el resultado de la suma de las calificaciones de los criterios por alternativa. De esta manera, según la cantidad de alternativas que se evalúen se obtendrán diferentes calificaciones totales. En la Tabla 8 se observa la forma de matriz de Richman que reúne lo anteriormente mencionado.

Tabla 8. Forma de la Matriz de Richman

Criterio	Valor	Ponderación	Calificación
Criterio 1	Valor 1	Peso 1	$C1 = (\text{Valor 1} \times \text{Ponderación 1})$
Criterio 2	Valor 2	Peso 2	$C2 = (\text{Valor 2} \times \text{Ponderación 2})$
Criterio 3	Valor 3	Peso 3	$C3 = (\text{Valor n} \times \text{Ponderación n})$
Total		$\sum 1$	$Ct = \sum Ci$

Fuente: BURITICÁ, Clara, *et al.* Formulación De Instrumentos Técnicos Que Estimulen El Aprovechamiento De La Biomasa En La Generación De Energía a Partir De Fuentes no Convencionales De Energía – FNCE, Producto 2 Soporte Técnico y Jurídico Para El Aprovechamiento Energético De La Biomasa Residual En Colombia. UPME, Udistrital, Minambiente. 2015.

Para aplicar el método de Multicriterios Ponderados en la determinación del tamaño de partícula es necesario encontrar la pendiente de la caída para las curvas de T vs. masa y t vs. masa, además se encuentra la pendiente del calentamiento del TGA (curva de T vs. t); esto se realiza para cada tamaño de partícula. En la Tabla 9 se muestra las pendientes para dicha priorización y el contenido de humedad después de la torrefacción para cada tamaño de partícula.

Tabla 9. Pendientes de las curvas del TGA y %H para cada tamaño de partícula

Tamaño de partícula	Temperatura - Tiempo	Temperatura - Masa	Tiempo - Masa	% H
B11	0,0847	-0,0048	-0,0009	0,73
B10	0,0898	-0,0051	-0,0008	0,66
B3	0,0858	-0,0043	-0,0007	1,64
M18	0,0888	-0,0029	-0,0004	2,25
M20	0,0885	-0,0045	-0,0004	2,26
Finos	0,0877	-0,0037	-0,0004	2,26

Se procede a asignar los valores más relevantes y menos relevantes para cada uno de los criterios tomados en cuenta, estos se pueden observar en la Tabla 10.

Tabla 10. Valores mínimos y máximos y su correspondiente valor asignado

	Temperatura - Tiempo	Temperatura - Masa	Tiempo - Masa	%H	valor asignado
máximo	0,0898	-0,0051	-0,0009	0,66	1
mínimo	0,0847	-0,0029	-0,0004	2,26	0

Se realiza la función de transformación para cada criterio. Estas funciones se muestran del Gráfico 7 al Gráfico 10.

Gráfico 7. Función de transformación para el criterio de temperatura vs tiempo

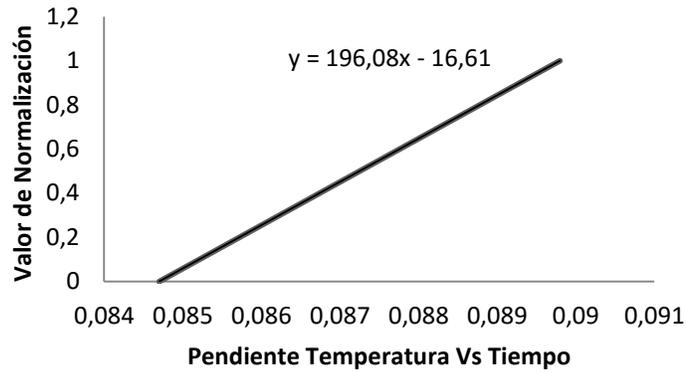


Gráfico 8. Función de transformación para el criterio de temperatura vs masa

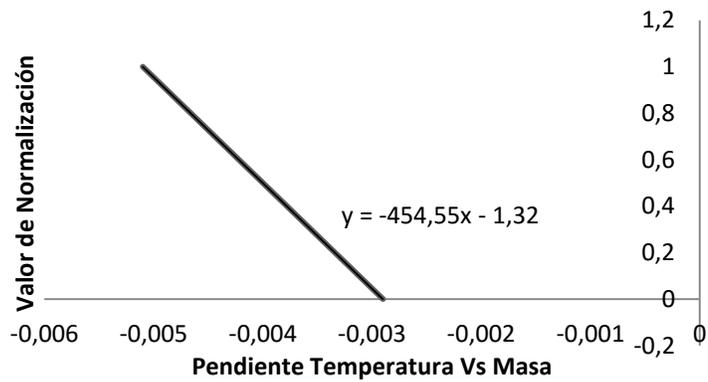


Gráfico 9. Función de transformación para el criterio de tiempo vs masa

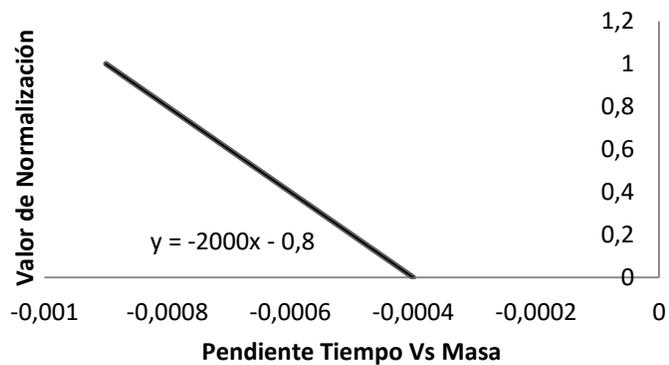
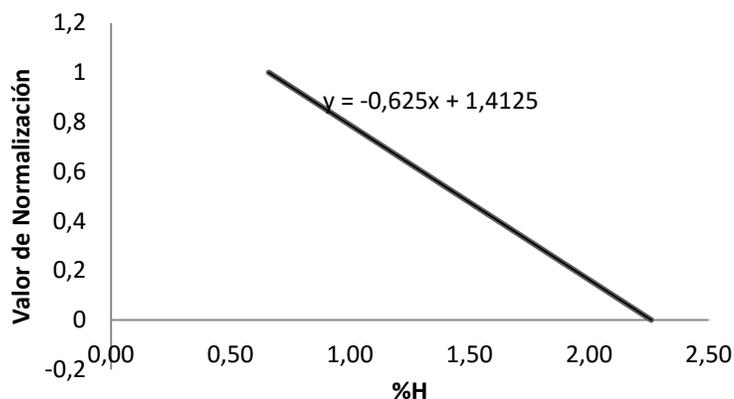


Gráfico 10. Función de transformación para el criterio de Porcentaje de Humedad



Una vez realizadas las funciones de transformación, los valores de la pendiente y el punto de intersección de estas rectas se utilizan para normalizar los datos (Ver Tabla 11).

Tabla 11. Datos normalizados para tamaño de partícula.

Tamaño de partícula	Temperatura - Tiempo	Temperatura - Masa	Tiempo - Masa	% H
B11	0,00	0,86	1,00	0,96
B10	1,00	1,00	0,80	1,00
B3	0,22	0,64	0,60	0,39
M18	0,80	0,00	0,00	0,01
M20	0,74	0,73	0,00	0,00
Finos	0,59	0,36	0,00	0,00

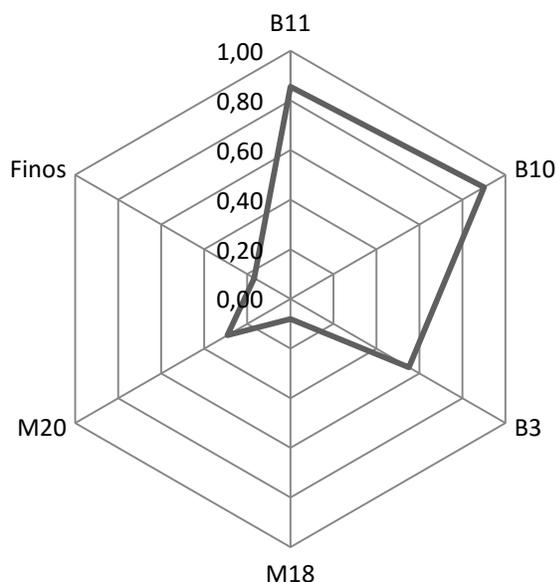
Posteriormente se definen los pesos para cada criterio con el fin de encontrar el índice de priorización más alto, el cual corresponde al tamaño de partícula seleccionado. El peso discutido de acuerdo a las autoras y el director para cada uno de los criterios se determinó así: (ver Cuadro 3)

Cuadro 3. Peso para cada criterio en la determinación del tamaño de partícula

Criterio	Peso (%)	Justificación
Temperatura vs. Tiempo	10	Se le da el valor más bajo debido a que es un criterio que se programa en el equipo termogravimétrico, sin embargo no se puede despreciar que existen diferencias en el calentamiento por la sensibilidad del equipo.
Temperatura vs. Masa	30	Se considera un criterio relevante debido a que es importante ver el cambio de masa con respecto a la temperatura, es decir, se busca que la biomasa pierda gran cantidad de masa a la temperatura menor posible, con ello, se evitan sobrecostos energéticos.
Tiempo vs. Masa	50	Se considera como el criterio más importante porque determina la velocidad de pérdida de masa de la biomasa torrefactada al momento de la combustión, se busca que esta reacción se de en un corto tiempo y con la mayor liberación de energía posible.
Contenido de Humedad	10	Es una propiedad limitante para el transporte de BR a largas distancias y largos lapsos, entre menor humedad tenga la BR, más rentable es el transporte porque lo ideal es transportar BR seca y no húmeda, así mismo, un bajo porcentaje de humedad, beneficia la combustión.

Los índices de priorización obtenidos luego de realizar la sumatoria se muestran en la Figura 26, a partir de la cual se observa que el tamaño de partícula nombrado como B10 presenta el índice mayor, 0,84, y por el contrario la M18 presenta el menor, 0,09.

Figura 26. Índices de priorización de tamaños de partícula priorizados



3.1.4 Análisis del tamaño de partícula como constante. Las gráficas de TGA permiten visualizar la pérdida de masa que tiene cada una de las muestras, de las cuales, la muestra de la bandeja 10 presenta una de las caídas más bruscas, de 0,9389 g a 0,3664 g (disminución de un 60% de masa) en el tiempo más corto, 25 segundos y en un rango de temperatura de 295°C a 346°C, lo que sitúa la B10 como posible opción en la selección de tamaño de partícula.

La priorización realizada mediante la metodología de Multicriterios ponderados demuestra que el tamaño de partícula de la bandeja 10 es el más indicado para el proceso de torrefacción, obtuvo el índice más alto, de 0,9.

Según la literatura, para la especie forestal Yellow Poplar³⁷, se manejan tamaños de astillas entre 10 y 30 mm, teniendo en cuenta que en el artículo se realiza torrefacción con otra tecnología (reactor de torrefacción) y a unas condiciones de operación definidas. El tamaño de partícula escogido por medio de la priorización (B10) que tiene las siguientes dimensiones: 0,56 cm, 3,44 cm y 1,84 cm de alto, largo y ancho respectivamente, no se aleja del tamaño de partícula trabajado en la literatura para Yellow Poplar, lo cual ratifica el tamaño escogido por la matriz de multicriterios.

³⁷ BYEONG-IL; BYOUNG-JUN; JAE-WON. Op. cit., p.39

3.2 NUMERO DE EXPERIMENTOS VARIANDO TEMPERATURA Y TIEMPO DE RESIDENCIA

La torrefacción de los residuos forestales, para la segunda etapa, se realiza variando la temperatura (entre 240°C, 260°C y 280°C) y el tiempo de residencia (entre 40min, 60 min y 80min) teniendo como tamaño de partícula la B10. Para la determinación del número de experimentos se toma en cuenta 3 niveles, 2 variables y una réplica, para un total de 18 experimentos (ver Ecuación 3).

El contenido de humedad, poder calorífico, porcentaje de cenizas y la hidrofobicidad son evaluadas para cada muestra torrefactada.

3.2.1 Variables de estudio. La temperatura y el tiempo de residencia de torrefacción son las dos variables de consideración para realizar la experimentación, la composición química de la BR puede variar significativamente con un cambio de estas dos propiedades, el propósito es obtener el poder calorífico más alto posible, la cantidad de humedad y cenizas más bajo, y un comportamiento hidrofóbico; el logro de esto significa una alta calidad de la biomasa residual y su aprovechamiento en la generación de energía eléctrica cuando debe ser transportada a largas distancias y durante periodos de tiempo extendidos.

3.2.1.1 Temperatura. Previo a la torrefacción, la biomasa dentro de la retorta pasa por un proceso de secado a aproximadamente 110°C, temperatura a la cual empieza a liberar humedad y la pérdida de materia volátil que se da por encima de 107°C³⁸.

La investigación exhaustiva en literatura³⁹ de estudios de torrefacción con residuos forestales y la experiencia del director, el Ingeniero Pedro Guevara, permite establecer los niveles de temperatura a los cuales el tamaño de partícula definido (B10) es sometido a torrefacción. Dichos niveles son: 240°C, 260°C y 280°C.

3.2.1.2 Tiempo de residencia. Al igual que en la temperatura de torrefacción, se establecen tres niveles de tiempo de residencia, 40, 60 y 80 minutos, estos niveles son definidos tras la discusión entre el director del proyecto y las estudiantes después de realizar la lectura de diferentes estudios de torrefacción⁴⁰. Además del presupuesto entregado por parte de la empresa y el tiempo requerido para la experimentación, factores que limitan el número de ensayos a realizar.

³⁸ AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. Op. cit., p. 40.

³⁹ BYEONG-IL; BYOUNG-JUN; JAE-WON. Op. cit., p.39

⁴⁰ *Ibíd.*, DOI 10.1007/s00226-014-0697-1

3.3 MATRIZ DE EXPERIMENTOS

Para la matriz de experimentos se tienen dos variables con tres niveles cada una, esta es una metodología sencilla de elaborar y funciona para establecer claramente la etapa de experimentación.

3.3.1 Número de montajes. El número de montajes se definió con la utilización de la Ecuación 3, de donde se obtuvo un resultado de 9 ensayos. La Tabla 12 presenta la matriz de experimentos, donde se tiene tres niveles para cada variable, 240°C, 260°C, 280°C y 2400 s, 3600 s y 5400 s de temperatura y tiempo de residencia de torrefacción respectivamente.

Tabla 12. Matriz de experimentos

	T1 = 240°C	T2 = 260°C	T3 = 280°C
t1 = 2400 s	B10	B10	B10
t2 = 3600 s	B10	B10	B10
t3 = 5400 s	B10	B10	B10

3.3.2 Variables fijas. La variable fija para realizar la experimentación es el tamaño de partícula, el cual se definió en el numeral 3.1.4, las dimensiones promedio de la BR utilizada para esta etapa de torrefacción son 0,56 cm, 3,44 cm y 1,84 cm de alto, largo y ancho respectivamente (B10).

3.3.3 Variables móviles. El tiempo de residencia y la temperatura de torrefacción son las dos variables móviles de la experimentación. A lo largo del documento se ha sustentado la importancia de ellas en las propiedades energéticas que adquiere la biomasa residual después de haberse sometido al proceso de torrefacción.

3.3.4 Número de réplicas. El número de réplicas definido ha sido una, es decir, en definitiva se realizan 18 ensayos de torrefacción. A diferencia de la primera etapa de torrefacción, en donde se selecciona el tamaño de partícula para la segunda y tercera etapa del proceso experimental, se escoge realizar una sola réplica al controlar las variables que hacían más sensible el equipo de TGA como se explica en el numeral 3.1.2.1 y por restricciones de presupuesto, dado que los análisis de poder calorífico se realizan en un laboratorio especializado (Interlabco S.A.S).

3.4 RESULTADOS DE LA EXPERIMENTACIÓN

En este aparte se muestran los resultados obtenidos a partir de la ejecución de la experimentación (ver numeral 3.2); además se muestran los análisis de resultados de humedad, cenizas, poder calorífico e hidrofobicidad.

3.4.1 Torrefacción a Diferentes tiempos y Temperaturas. Se realiza la torrefacción de BRF con el tamaño de partícula seleccionado en el numeral 3.1 (B10). Esta torrefacción se realiza programando un tiempo de calentamiento en el horno rotatorio de 1 hora y un tiempo de sostenimiento que depende del tiempo de residencia que se va a evaluar.

La biomasa torrefactada a diferentes tiempos y temperaturas se muestra a continuación (ver Figura 27 a la Figura 29).

Figura 27. Biomasa torrefactada a 240°C durante 40 min (izquierda), 60 min (mitad) y 80 min (derecha) junto con su réplica (color rosado)



Figura 28. Biomasa torrefactada a 260°C durante 40 min (izquierda), 60 min (mitad) y 80 min (derecha) junto con su réplica (color rosado)



Figura 29. Biomasa torrefactada a 280°C durante 40 min (izquierda), 60 min (mitad) y 80 min (derecha) junto con su réplica (color rosado)



A partir de la Figura 27, Figura 28 y Figura 29 se observa como la intensidad del color varía con la temperatura de torrefacción, la biomasa torrefactada a 240°C presenta el color café más claro y la BR a 280°C el más oscuro, sin haberse carbonizado, es decir, que los niveles de temperatura y tiempo de residencia funcionan para el tamaño de partícula seleccionado debido a que ninguna muestra

se carbonizo, lo cual se podría evidenciar si la BR hubiera tomado un color negro oscuro después del proceso.

3.4.2 Curvas Termogravimétricas. Las curvas se realizan nuevamente haciendo uso del equipo de TGA utilizado para la determinación del tamaño de partícula. Éste se programa a una temperatura de 800°C con el fin de determinar cenizas, aproximadamente en 500°C se le agrega aire seco para mejorar la combustión de la muestra.

En la segunda etapa de torrefacción se realiza ensayos a diferentes tiempos y temperaturas y una réplica para cada ensayo. Al graficar las curvas de T vs. t (temperatura) y de masa vs. t (masa) para cada ensayo y replica se observa que éstas se encuentran una muy cercana a la otra, por tal razón se decide encontrar la desviación de la raíz cuadrada media (RMSD) descrita anteriormente en el numeral 3.1.2; los resultados obtenidos de RMSD se muestran a continuación: (ver Tabla 13)

Tabla 13. RMSD para diferentes condiciones de temperatura y tiempo para las variables de temperatura y masa

Condiciones	RMSD(*)	
	Temperatura	Masa
240°C - 80 minutos	23,534	0,072
260°C - 80 minutos	26,646	0,082
280°C - 80 minutos	16,658	0,069
240°C - 40 minutos	10,575	0,038
260°C - 40 minutos	11,239	0,050
280°C - 40 minutos	19,165	0,049
240°C - 60 minutos	34,788	0,057
260°C - 60 minutos	13,453	0,088
280°C - 60 minutos	34,143	0,070

Nota: (*) valores adimensionales

Los resultados obtenidos evidencian que las curvas de masa presentan la misma tendencia, dado el bajo valor del RMSD. En cuanto a las curvas de temperatura, el RMSD es alto, en comparación con los valores de RMSD para masa, para las condiciones de 240°C – 80 minutos, 260°C – 80 minutos, 240°C – 60 minutos y 280°C – 60 minutos; sin embargo, el comportamiento de las curvas es igual, debido a que las rampas de temperatura se programaron con los mismos datos durante todos los ensayos (velocidad de calentamiento, temperatura máxima), y la desviación es producto de que la temperatura de inicio del TGA estuvo condicionada por la temperatura ambiente, la cual fue de 18°C para algunos ensayos y de 24°C para otros.

Desde el Gráfico 11 hasta el Gráfico 19 se muestran las curvas de TGA obtenidas de los ensayos termogravimétricos.

Gráfico 11. TGA para Temperatura 240°C y Tiempo de 40 minutos

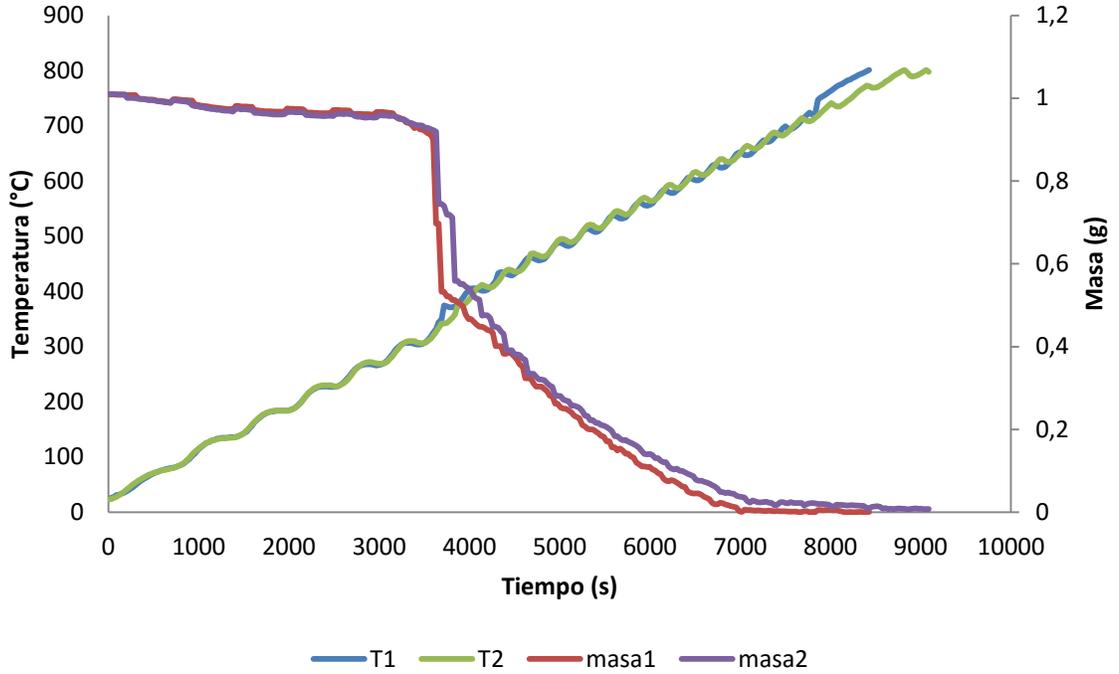


Gráfico 12. TGA para Temperatura 240°C y Tiempo de 60 minutos

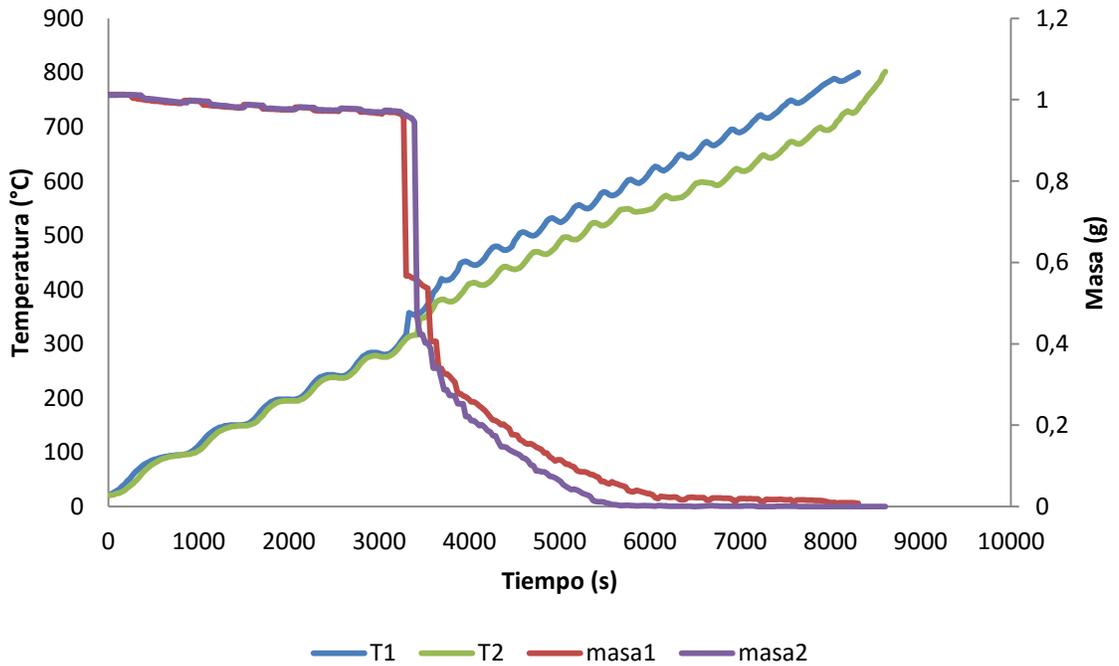


Gráfico 13. TGA para Temperatura 240°C y Tiempo de 80 minutos

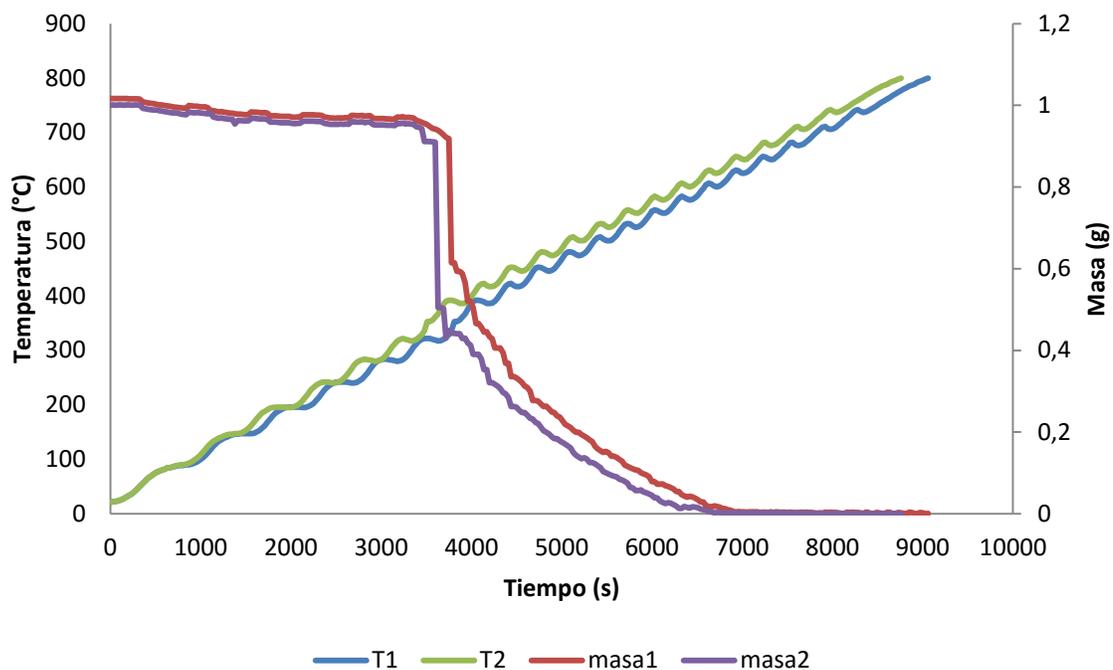


Gráfico 14. TGA para Temperatura 260°C y Tiempo de 40 minutos

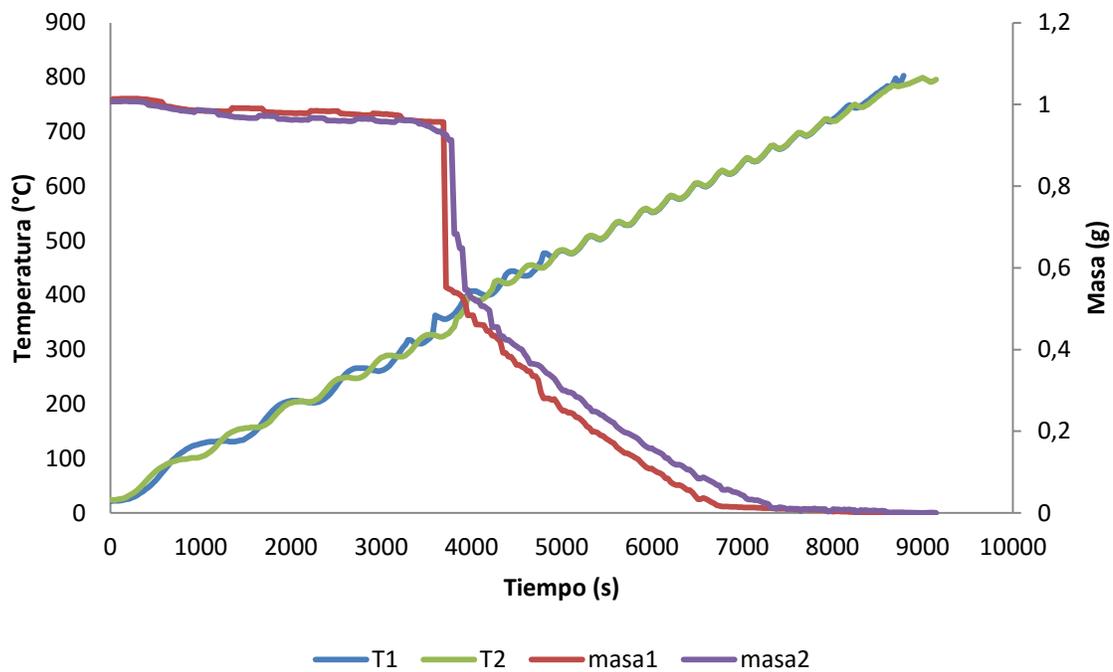


Gráfico 15. TGA para Temperatura 260°C y Tiempo de 60 minutos

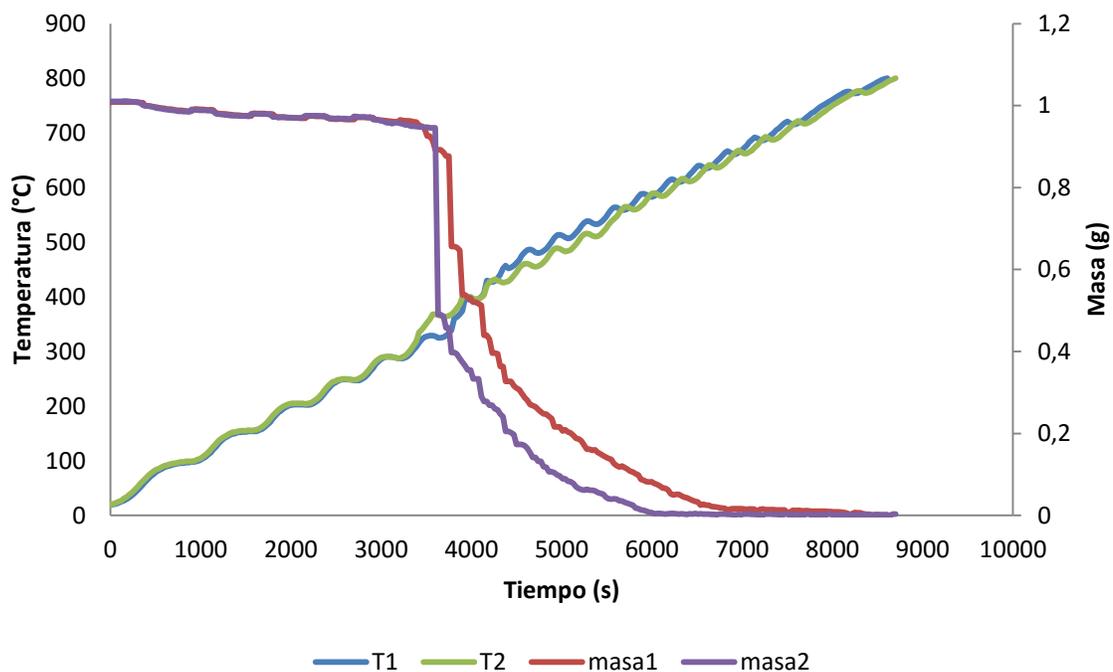


Gráfico 16. TGA para Temperatura 260°C y Tiempo de 80 minutos

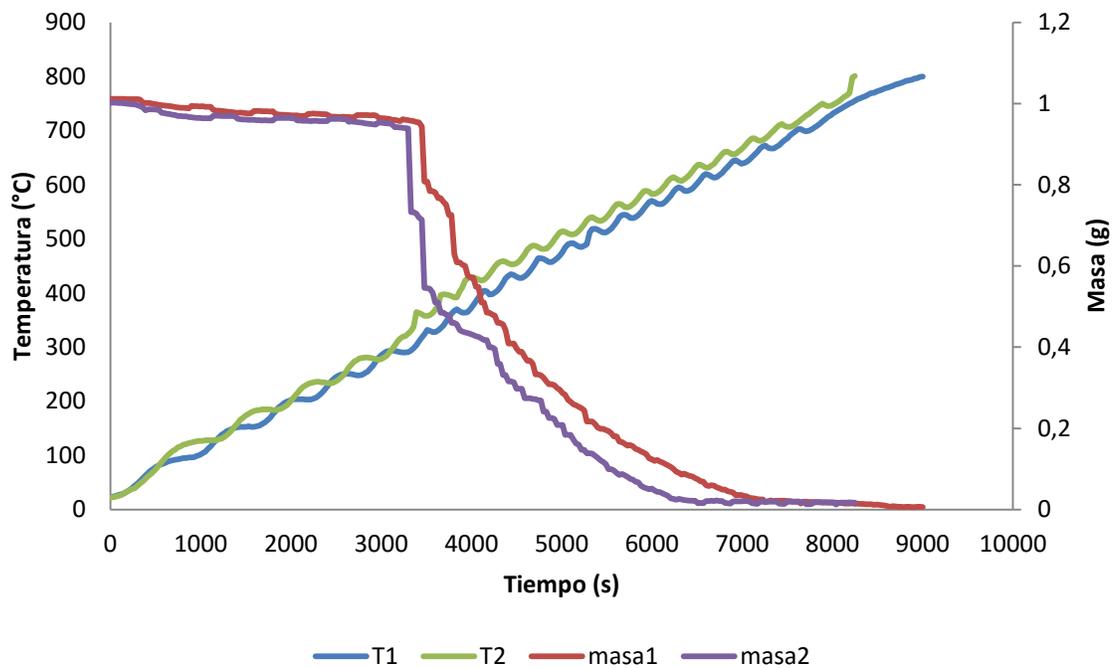


Gráfico 17. TGA para Temperatura 280°C y Tiempo de 40 minutos

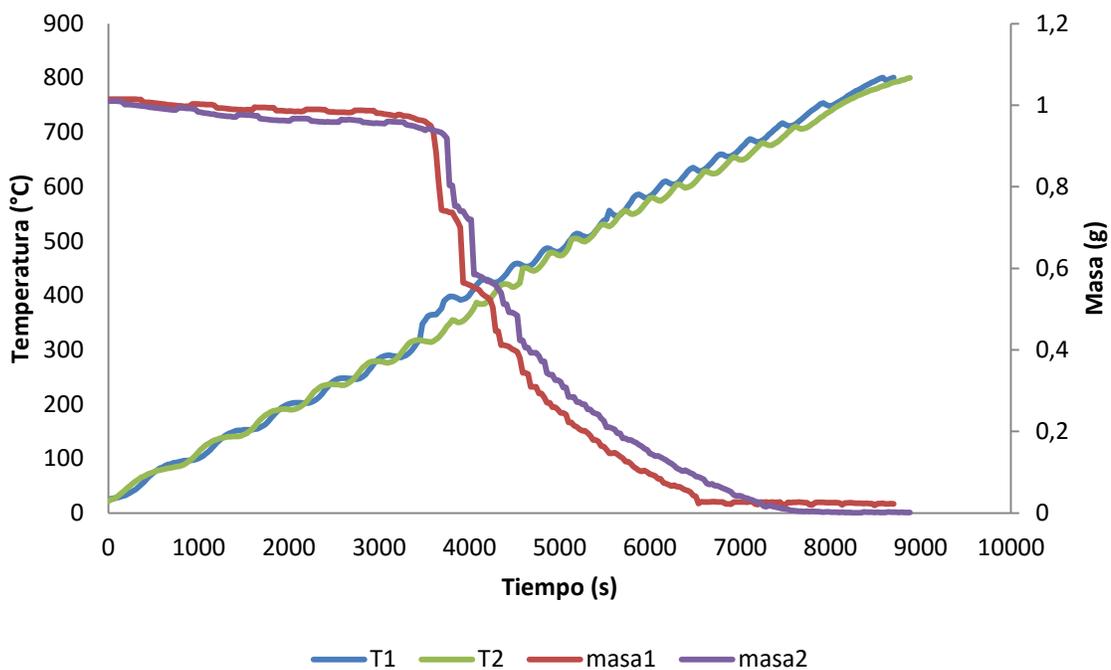


Gráfico 18. TGA para Temperatura 280°C y Tiempo de 60 minutos

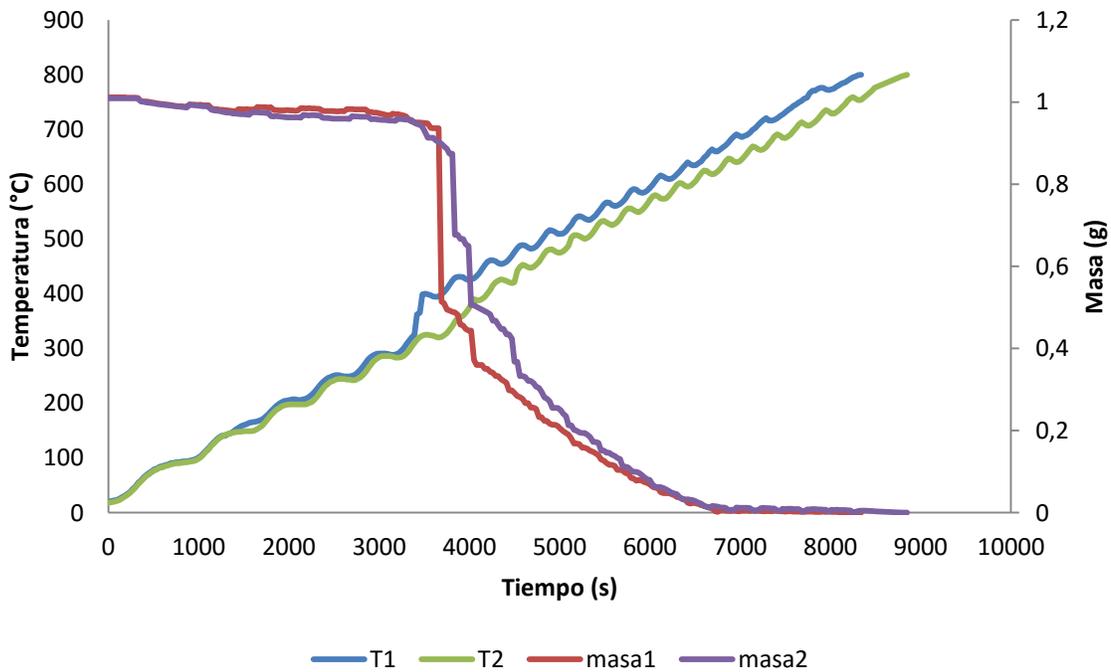
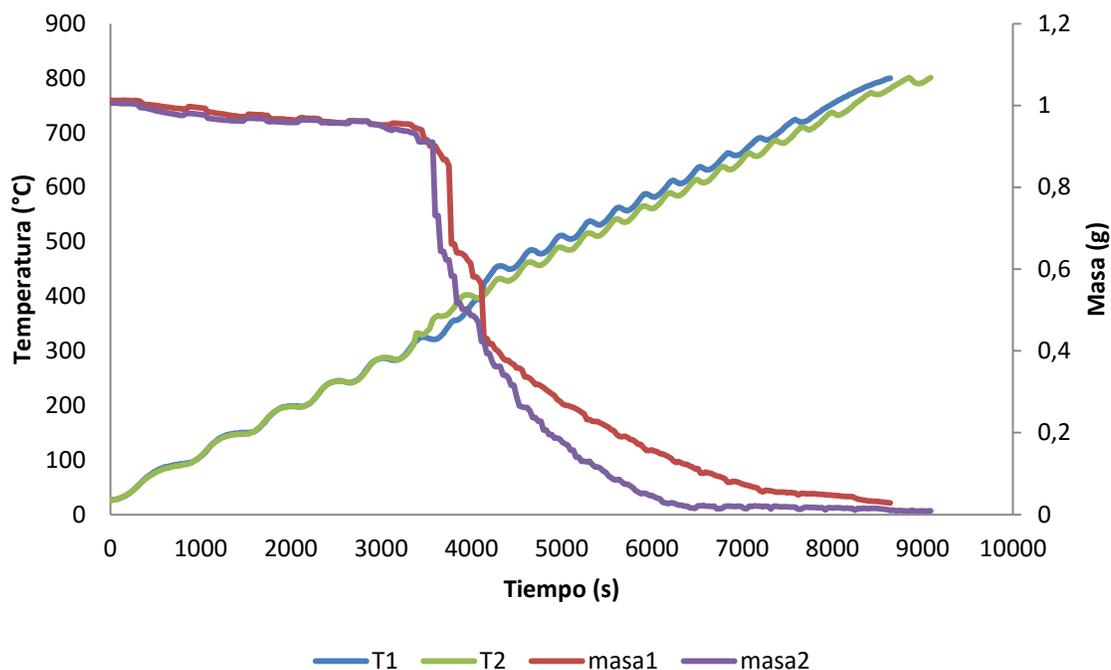


Gráfico 19. TGA para Temperatura 280°C y Tiempo de 80 minutos



Como las curvas presentan la misma tendencia, se realiza un promedio (ver Ecuación 5) entre las los curvas (ensayo y réplica) para la temperatura vs. tiempo y masa vs. tiempo. Los resultados de las curvas se utilizan para encontrar los porcentajes de humedad y cenizas.

Ecuación 5. Promedio realizado entre ensayo y replica

$$X = \frac{x_1 + x_2}{2}$$

Donde x_1 es el valor obtenido en el ensayo y x_2 es el valor obtenido en la réplica.

3.4.3 Humedad. El contenido de humedad, variando las condiciones de temperatura y tiempo de residencia, se encuentra utilizando la Ecuación 2 que se reporta en la sección 2.2.2; para aplicar dicha ecuación se utiliza la masa inicial y la masa a los 110 °C procedente del análisis termogravimétrico. Se toma un promedio de las curvas a razón que presentan la misma tendencia.

El contenido de humedad es importante para la determinación de las condiciones apropiadas para el proceso de torrefacción dado que se busca que la BR torrefactada tenga un bajo contenido de humedad. En la Tabla 14 se evidencian las humedades obtenidas para cada una de las condiciones de temperatura y tiempo de residencia.

Tabla 14. Cálculo de humedades (%) para diferentes condiciones de torrefacción

	240°C	260°C	280°C
40 min	2,67	1,90	1,65
60 min	1,52	1,94	1,88
80 min	1,95	1,98	1,86

3.4.4 Cenizas. Las cenizas son de importancia al momento de utilizar la biomasa torrefactada (ya sea en combustión o co-combustión para la generación de energía térmica o eléctrica) porque representa la cantidad de biomasa que no participa en la reacción de combustión; es decir que a menor cantidad de cenizas, mayor es la cantidad de biomasa se utiliza en la combustión.

El cálculo para encontrar las cenizas se realizó tomando el dato inicial y dividido por el dato de la masa a una temperatura de 720°C aproximadamente. Cabe recordar que se toma un promedio de las curvas de masa vs. tiempo para encontrar los valores de ceniza dependiendo de las condiciones que se evalúan (temperaturas de 240°C, 260°C, 280°C con tiempos de residencia de 40 minutos, 60 minutos y 80 minutos).

En la Ecuación 6⁴¹ se puede visualizar la fórmula utilizada para calcular el porcentaje de cenizas de las muestras torrefactadas. Para encontrar del porcentaje de cenizas se toma como base la norma ASTM D3174.

Ecuación 6. Cálculo de cenizas

$$\%Cenizas = \frac{\textit{masa residuo en la copa} - \textit{masa de la copa vacia}}{\textit{masa inicial}} * 100$$

De acuerdo a la metodología utilizada para realizar los ensayos de TGA, los datos graficados son aquellos que no poseen el peso de la copa, por lo tanto el cálculo se reduce a la Ecuación 7.

Ecuación 7. Cálculo de cenizas reducida

$$Cenizas = \frac{\textit{masa del residuo}}{\textit{masa inicial}} * 100$$

De acuerdo a la Ecuación 7 se obtienen los siguientes resultados para el porcentaje de cenizas: (ver Tabla 15).

⁴¹ AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. Op. cit., p. 40.

Tabla 15. Resultados de cenizas (%) para diferentes condiciones de operación

	240°C	260°C	280°C
40 min	0,66	0,28	0,62
60 min	0,67	0,31	0,67
80 min	0,20	0,66	1,05

3.4.5 Poder Calorífico. Para realizar las pruebas de poder calorífico se toman aproximadamente 10 gramos de biomasa torrefactada a diferentes temperaturas y tiempos de residencia que contiene muestra de la torrefacción y del duplicado; además de una tercera torrefacción única y exclusivamente para enviar al laboratorio.

Estas pruebas se envían a realizar al laboratorio INTERLABCO S.A.S. (Ver Anexo B). A continuación se reportan resultados obtenidos: (Ver Tabla 16)

Tabla 16. Resultados prueba de poder calorífico

Condiciones	Poder Calorífico Superior (kcal/Kg)
240 °C – 40 min	4.006
240 °C - 60 min	4.268
240 °C - 80 min	4.378
260 °C - 40 min	4.180
260 °C - 60 min	4.305
260 °C - 80 min	4.420
280 °C - 40 min	4.287
280 °C - 60 min	4.325
280 °C - 80 min	4.338

3.4.6 Hidrofobicidad. La hidrofobicidad se define según Brown⁴² como la “repulsión de ciertas moléculas por el agua”; esta es una propiedad importante para evaluar debido a que según la literatura, después del proceso de torrefacción, la BRF puede repeler agua para ser almacenada en lugares con mucha humedad⁴³, lo anterior quiere decir que no requiere de cuidados especiales para su almacenamiento lo que evita el aumento de costos en el proceso.

Las pruebas de hidrofobicidad que se realizan están adaptadas de la literatura, las pruebas se basan en el artículo “Changes in chemical and physical properties of yellow poplar (*Liriodendron tulipifera*) during torrefaction”⁴⁴, en el cual una muestra

⁴² BROWN, Theodore. Química, la ciencia central. Decimoprimer edición. Pearson Education, México, 2009. Apéndice G, Pág. G7

⁴³ DISTRENDS PLANETA SUSTENTABLE. ¿Qué Es Torrefacción De La Biomasa?. [citado el día 4 de mayo de 2016]. Disponible en: <<https://distrends.com/que-es-torrefaccion-de-la-biomasa/>>.

⁴⁴ BYEONG-IL; BYOUNG-JUN; JAE-WON. Op. cit., p. 39.

de biomasa torrada se sumerge en agua durante dos horas para mirar el comportamiento que presenta.

La metodología que se utiliza para el presente proyecto es la siguiente: se selecciona 0,52 g de biomasa torrefactada proveniente de ensayos a diferentes temperaturas y tiempos de residencia; además de un blanco para cada muestra torrada seleccionada con la misma masa (ver Figura 30). La muestra seleccionada corresponde a una muestra aleatoria extraída del ensayo o duplicado de ensayo con las condiciones de preferencia.

Se procede a sumergir la biomasa durante dos horas en agua y agitar a 182 rpm para asegurar que la biomasa se empape (ver Figura 31), para seguidamente tomar datos de masa apenas se retira del agua y pesar nuevamente después de 1 hora de ser retirada.

Figura 30. Biomasa cruda y torrefactada antes de ser sumergida en agua.



Figura 31. Biomasa para prueba de hidrofobicidad en agitación



En la Tabla 17 se muestran los datos de masa obtenidos antes y después de sumergir la biomasa en agua, además de la masa luego de una hora de ser retirada del agua.

Tabla 17. Masa de la biomasa durante los ensayos de hidrofobicidad

		Masa antes de agitación (g)	Masa después de agitación (g)	Masa luego de una hora (g)
240°C - 80 min	Torrefactada	0,5280	0,6893	0,5813
	Cruda	0,5281	0,8340	0,7031
260°C - 80 min	Torrefactada	0,5265	0,5757	0,5384
	Cruda	0,5265	0,6642	0,5900
280°C - 80 min	Torrefactada	0,5273	0,7173	0,6051
	Cruda	0,5273	0,8325	0,7409
240°C - 40 min	Torrefactada	0,5268	0,6199	0,5569
	Cruda	0,5248	0,8982	0,7527
260°C - 40 min	Torrefactada	0,5209	0,5920	0,5392
	Cruda	0,5203	0,6637	0,5917
280°C - 40 min	Torrefactada	0,5262	0,7238	0,6289
	Cruda	0,5264	0,8960	0,7728
240°C - 60 min	Torrefactada	0,5250	0,6717	0,5744
	Cruda	0,5230	0,7680	0,6552
260°C - 60 min	Torrefactada	0,5239	0,6294	0,5545
	Cruda	0,5217	0,8991	0,7702
280°C - 60 min	Torrefactada	0,5245	0,6169	0,5444
	Cruda	0,5235	0,7025	0,6125

En la Tabla 18 se aprecia los porcentajes de humedad que ganó la biomasa cruda y torrefactada a diferentes temperaturas durante el proceso de agitación. Estos porcentajes se determinaron utilizando la fórmula de humedad (ver Ecuación 2). Los datos que se utilizaron fueron las masas iniciales y las masas luego de una hora de ser retirada la biomasa del agua.

Tabla 18. Porcentajes de humedad de la biomasa.

		% Humedad luego de una hora
240°C - 80 minutos	Torrefactada	10,09%
	Cruda	33,14%
260°C - 80 minutos	Torrefactada	2,26%
	Cruda	12,06%
280°C - 80 minutos	Torrefactada	14,75%
	Cruda	40,51%
240°C - 40 minutos	Torrefactada	5,71%
	Cruda	43,43%
260°C - 40 minutos	Torrefactada	3,51%
	Cruda	13,72%
280°C - 40 minutos	Torrefactada	19,52%
	Cruda	46,81%

		% Humedad luego de una hora
240°C - 60 minutos	Torrefactada	9,41%
	Cruda	25,28%
260°C - 60 minutos	Torrefactada	5,84%
	Cruda	47,63%
280°C - 60 minutos	Torrefactada	3,79%
	Cruda	17,00%

3.5 ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este aparte se analizan los resultados obtenidos de humedad, cenizas, poder calorífico e hidrofobicidad mostrados en el numeral 3.4.

3.5.1 Humedad. La humedad más baja resulta a las condiciones de 240°C y 60 minutos (1,52%) y la humedad más alta a las condiciones de 240°C y 40 minutos (2,67%), posiblemente porque la energía de esa temperatura a ese tiempo no es suficiente para permitir mayor liberación de agua.

Las humedades de la BR torrefactada (ver Tabla 14) dan más bajas que la biomasa cruda (%H de 2,86, tomado de la Tabla 5 para la B10) gracias al proceso de torrefacción a diferentes temperaturas y diferentes tiempos de residencia lo que produce la liberación de moléculas de agua que se encuentran dentro de la biomasa.

Lo anterior, demuestra que la torrefacción funciona como un proceso térmico, en el cual el contenido de agua en la biomasa disminuye.

3.5.2 Cenizas. Las humedades que se obtienen están entre el 0,20% y el 1,05%; el menor porcentaje de cenizas se obtiene para la combinación de temperatura y tiempo de residencia de 240°C y 80 minutos respectivamente (0,20%) y, el mayor porcentaje de cenizas se obtiene para 280°C y 80 (1,05%).

Según la literatura, Johanna Gaitán⁴⁵ reporta valores para %Ce de dos especies forestales (*Dipteryx panamensis Pittier* y *Gmelina arborea*) entre 0,39% y 1,07%; por tanto, los resultados obtenidos en el presente proyecto están en el mismo orden que los encontrados en la referencia anteriormente mencionada. Sin embargo, Gaitán utiliza unas condiciones de operación y una tecnología de torrefacción diferentes a las trabajadas.

(*) Los resultados de las pruebas de PC se encuentran reportados en la Tabla 16.

⁴⁵ GAITÁN, Johanna. Propiedades energéticas de biomasa torrefaccionada de *Dipteryx panamensis Pittier* y *Gmelina arborea Roxb. ex Sm.* Revista Forestal Mesoamericana Kurú. Vol.13. 2015.

3.5.3 Poder calorífico. El mayor poder calorífico que se obtiene de las diferentes muestras torrefactadas es a las condiciones 260 °C - 80 min con un PC de 4.420 kcal/kg y la que tiene un menor poder calorífico es a las condiciones 240 °C – 40 min con 4.006 kcal/kg. (*)

En la Tabla 19 se detallan los porcentajes de desviación entre la biomasa cruda y la biomasa torrada según las condiciones de torrefacción. La desviación se encuentra haciendo uso de la fórmula reportada en Ecuación 8.

Ecuación 8. Porcentaje de Desviación

$$\% \text{ Desviación} = \frac{PC \text{ Biomasa Cruda} - PC \text{ biomasa torrefactada}}{PC \text{ Biomasa Cruda}}$$

Donde PC es el poder calorífico reportado en los análisis.

Tabla 19. Comparación del poder calorífico de la biomasa cruda y la biomasa torrada

Condiciones	Desviación
240 °C – 40 min	0,96%
240 °C - 60 min	5,51%
240 °C - 80 min	8,23%
260 °C - 40 min	3,34%
260 °C - 60 min	6,43%
260 °C - 80 min	9,27%
280 °C - 40 min	5,98%
280 °C - 60 min	6,92%
280 °C - 80 min	7,24%

El poder calorífico de biomasa torrefactada que presenta la desviación más baja con respecto a la biomasa cruda corresponde a las condiciones 240 °C – 40 min con un valor de 0,96%, aclarando que la biomasa cruda registro un poder calorífico de 4.045 kcal/Kg y está un PC de 4.006 kcal/Kg, estando la BR torrefactada a estas condiciones por debajo del PC de la biomasa cruda.

La condición que tiene un mayor porcentaje de desviación con respecto a la biomasa cruda es 260 °C - 80 min con un valor de 9,27%, vale aclarar que en la comparación del poder calorífico entre la biomasa cruda y la biomasa torrada se busca es que dicha desviación sea mayor, esto siempre y cuando el PC de la biomasa cruda este por debajo del PC de la biomasa torrada; es decir, entre mayor sea la desviación, mayor es el aumento de la energía en la biomasa debido al proceso de torrefacción.

Según la literatura⁴⁶ se reporta un aumento de un 15,01% en el PC después de un tratamiento térmico con torrefacción; no obstante en dicha referencia se utiliza solo una especie forestal (Yellow Poplar) y se utiliza una tecnología diferente (reactor de torrefacción).

3.5.4 Hidrofobicidad. Se evidencia un cambio en el contenido de humedad de la biomasa cruda y la biomasa torrefactada luego del análisis de hidrofobicidad, si se analiza los datos obtenidos a las mismas condiciones. La biomasa torrefactada que posee un mayor porcentaje de absorción de agua fue la de 280°C – 40 minutos con 19,52%, mientras que la biomasa que posee un menor porcentaje de absorción de agua, es decir, la biomasa torrada más hidrofóbica fue la de 260°C – 80 minutos con 2,26%.

Las humedades resultantes luego de las pruebas de hidrofobicidad registran un amplio rango que va desde 2,26 % hasta 47,63%, esto se presenta porque el ensayo se realiza utilizando una sola astilla de biomasa (cruda o torrefactada) que podría ser de cualquiera de las especies que se trabajan, aunque se garantizó que la astilla torrefactada fuera de la misma especie que la astilla cruda (blanco). No obstante, se evidencia en términos generales, que las humedades de biomasa torrefactada son menores (entre 2,26% y 19,52%) en comparación a los blancos (biomasa cruda) que se encuentran entre 12,06% y 47,63%; en conclusión, la biomasa después del proceso de torrefacción adquiere propiedades de hidrofobicidad.

3.6 DETERMINACIÓN DE LAS CONDICIONES IDEALES DEL OPERACIÓN A NIVEL LABORATORIO

La determinación del tiempo de residencia y temperatura de torrefacción ideales para el proceso de torrefacción se evalúa mediante la metodología de multicriterios ponderados que fue utilizada para la priorización del tamaño de partícula.

Los criterios utilizados para llevar a cabo la priorización de tiempo de residencia y temperatura son: porcentaje de humedad, cenizas, poder calorífico y comportamiento hidrofóbico; el peso asignado a cada uno de estos criterios fue consecuencia de la discusión entre el director y las autoras.

Con los resultados obtenidos de humedad, cenizas, poder calorífico e hidrofobicidad en los numerales 3.4.3, 3.4.4, 3.4.5 y 3.4.6 respectivamente, se realiza la priorización. A continuación se presenta el peso asignado a cada criterio (ver Cuadro 4).

⁴⁶ BYEONG-IL; BYOUNG-JUN; JAE-WON. Op. cit., p. 39.

Cuadro 4. Criterios evaluados para el proceso de priorización

Criterio	Peso (%)	Justificación
Poder calorífico	70	El valor de esta propiedad determina la calidad de un combustible, entre mayor sea, mayor es la energía desprendida durante la combustión. De igual forma condiciona la rentabilidad del transporte de BR, es decir, cuanta energía se transporta en un volumen determinado a una central de generación termoeléctrica.
Humedad	10	Es una propiedad limitante para el transporte de BR a largas distancias y largos lapsos, entre menor humedad tenga la BR, más rentable es el transporte porque lo ideal es transportar BR seca y no húmeda, así mismo, un bajo porcentaje de humedad, beneficia la combustión.
Cenizas	5	Representa la cantidad de biomasa que no participa en la combustión, entre menor sea este valor, se garantiza que la biomasa torrefactada convertida en combustible sólido está siendo aprovechado eficientemente.
Hidrofobicidad	15	Este criterio permite visualizar el efecto que tiene la torrefacción en la BR al otorgarle un comportamiento hidrofóbico, es decir, una vez torrefactada la BR y almacenada al aire libre o durante su transporte a la planta de generación no captura la misma cantidad de humedad del ambiente a como si estuviera cruda. Se busca que el porcentaje de captación de agua en un tiempo determinado sea lo más pequeño posible.

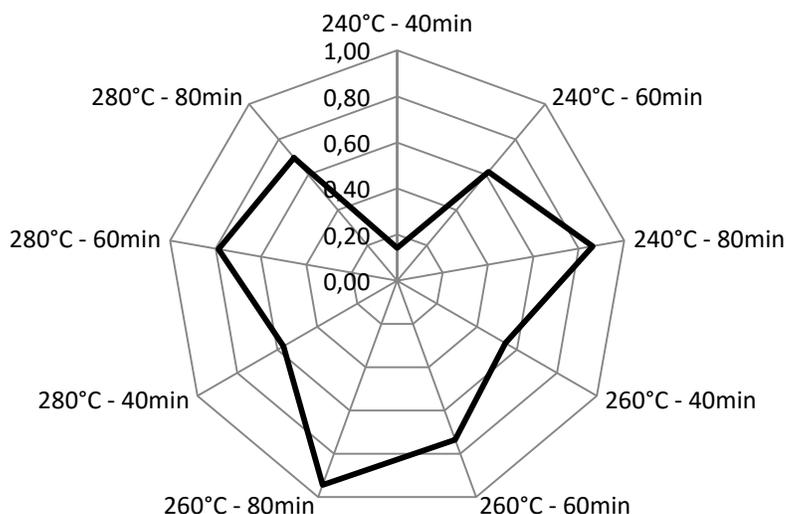
Siguiendo el procedimiento de desarrollo de la metodología de multicriterios ponderados, explicado anteriormente en la sección 3.1.3, y los datos obtenidos de %H, PC, %Ce e hidrofobicidad, se realiza la normalización de los datos de cada criterio (ver Tabla 20). Se ha asignado 1 al valor que favorece el criterio de acuerdo a la justificación presentada en el Cuadro 4 y cero (0) al valor que por el contrario no beneficia la selección. En el Anexo D se pueden encontrar las funciones de transformación utilizadas para realizar la normalización de datos.

Tabla 20. Datos normalizados para cada uno de los criterios establecidos

	70,0%	10,0%	5,0%	15,0%
Parámetro	PC	%H	%Ce	Hidrofobicidad
240 - 40	0,000	0,000	0,456	0,800
240 - 60	0,633	0,626	0,452	0,586
240 - 80	0,899	1,000	1,000	0,546
260 - 40	0,420	0,635	0,901	0,927
260 - 60	0,722	0,670	0,867	0,793
260 - 80	1,000	0,713	0,458	1,000
280 - 40	0,679	0,687	0,502	0,000
280 - 60	0,771	0,887	0,450	0,911
280 - 80	0,802	0,930	0,000	0,276

Finalmente, se realiza la calificación para cada parámetro, en la Figura 32 se observa los resultados obtenidos.

Figura 32. Índices de priorización



A partir de la Figura 32 se obtiene que la combinación de temperatura y tiempo de residencia que favorece las propiedades de poder calorífico, porcentaje de humedad, contenido de cenizas e hidrofobicidad para la biomasa torrefactada son 260°C y 80 min, cuya calificación es 0,94, y los parámetros que tuvieron menor calificación fue 240°C y 40 min con 0,14.

3.7 TORREFACCIÓN DE LA BIOMASA RESIDUAL FORESTAL A NIVEL PLANTA PILOTO CON LAS CONDICIONES IDEALES IDENTIFICADAS

Los resultados obtenidos de los ensayos de torrefacción a nivel laboratorio permitieron determinar las condiciones de operación del proceso y el tamaño de partícula de la materia prima, biomasa residual; en este apartado se muestran los datos resultantes de poder calorífico, porcentaje de humedad, contenido de cenizas e hidrofobicidad para una muestra torrefactada de residuos forestales, igual a la trabajada en las primeras etapas de experimentación y con iguales medidas promedio (0,56 cm, 3,44 cm y 1,84 cm de alto, largo y ancho respectivamente), en un horno rotatorio a nivel planta piloto bajo el mismo tiempo de residencia (80 min) y temperatura de torrefacción (260°C) con el propósito de validar los datos determinados a nivel laboratorio.

A diferencia del horno de laboratorio, el horno a nivel planta piloto es continuo y presenta una inclinación que depende del tiempo de residencia necesario. Para lograr 80 min de residencia, el horno se inclina a 0,97°; por otro lado no trabaja con N₂, sino que garantiza un sistema anaeróbico en su interior mediante la reacción de combustión en donde se consume el oxígeno del interior del equipo; este modelo de funcionamiento del horno fue puesto en conocimiento por los ingenieros que diseñaron y construyeron el horno, el resto es secreto comercial de la empresa Tecsol Ltda.

Con la anterior descripción y sin encontrar una diferencia en los equipos utilizados o los mecanismos del proceso que puedan causar resultados completamente diferentes a los obtenidos a nivel laboratorio se realiza la caracterización para la muestra sometida a validación.

El horno rotatorio de nivel planta piloto tiene una alimentación de 52 kg/h de biomasa cruda, la caracterización y los balances se realizan para el proceso de torrefacción a nivel planta piloto haciendo uso de un horno rotatorio horizontal.

3.7.1 Caracterización final de la biomasa torrefactada. Se realiza la caracterización a la biomasa torrefactada en el horno rotatorio a nivel planta piloto, esta incluye: poder calorífico, contenido de humedad, porcentaje de cenizas e hidrofobicidad, a continuación se presenta los resultados obtenidos para cada una de las propiedades nombradas. Al final de este numeral se presenta una tabla comparativa (datos de nivel laboratorio y planta piloto) de los resultados de esta caracterización y la realizada en el numeral 3.4, junto con el porcentaje de error de los dos valores evaluados.

3.7.1.1 Poder calorífico. Al igual que para las muestras torrefactadas bajo diferentes temperaturas y tiempos de residencia, de las cuales fue necesario el valor de poder calorífico, se utilizó los servicios del laboratorio especializado, Interlabco S.A.S, allí se envió la cantidad necesaria de biomasa torrefactada a 260°C y 80 min para que se le realizara el análisis de poder calorífico, cuyo valor es 4.342 Kcal/kg en base seca y se reporta en el Anexo C, el método utilizado fue ASTM D5865- 11a.

3.7.1.2 Contenido de humedad. El contenido de humedad se calculó mediante la Ecuación 2 (ver numeral 2.2.2) a partir de los valores arrojados por el equipo termogravimétrico, exactamente con la masa registrada a 110°C, el porcentaje de humedad calculado fue de 1,60%.

3.7.1.3 Porcentaje de cenizas. De la misma manera que para el cálculo de contenido de humedad, el porcentaje de cenizas se calculó a partir de los datos entregados en el análisis termogravimétrico (valor a 720°C), y utilizando la Ecuación 6 (ver numeral 3.4.4), que dio por resultado 0,54% de Ce.

Con el propósito de entregar un panorama completo de los resultados obtenidos en la validación, se calcula el porcentaje de error (ver Ecuación 9) de los resultados obtenidos en las dos caracterizaciones realizadas.

Ecuación 9. Cálculo porcentaje de error

$$\%E = \frac{v_o - v_i}{v_o} * 100$$

Donde v_o es el valor resultado de la torrefacción a nivel laboratorio
 v_i es el valor resultado de la torrefacción a nivel planta piloto

A continuación la Tabla 21 reporta los resultados de las caracterizaciones nombradas, y el porcentaje de error calculado; a partir de estos datos se considera que la biomasa torrefactada en el horno rotatorio a nivel planta piloto adquiere las mismas propiedades de la biomasa torrefactada en el horno a nivel laboratorio, es decir, las condiciones determinadas funcionan para llevar a cabo el proceso en un horno de mayores dimensiones.

Tabla 21. Porcentaje de error encontrado en la caracterización a nivel laboratorio y nivel planta piloto para un muestra torrefactada a 260°C y 80 min con el mismo tamaño de partícula.

Criterio	Validación (planta piloto)	Ensayo en horno a nivel laboratorio	% error
H (%)	1,60	1,85	13,51
Ce (%)	0,54	0,66	18,18
PC (Kcal/kg)	4.342	4.420	1,76
Hidrofobicidad (%)	2,57	2,26	13,70

El mayor porcentaje de error encontrado fue para el cálculo de contenido de cenizas, de 18,18%, esta variación es posible a la sensibilidad del equipo TGA, de la cual se ha hablado anteriormente, además, a la temperatura de 720°C a la cual se reporta la masa para el cálculo de cenizas, la biomasa ha pasado por la reacción de combustión, pirólisis rápida, durante las cuales la pérdida de masa no se puede controlar. Otra de las posibles razones es el bajo número de réplicas realizadas (una) por cuestiones de presupuesto y tiempo.

Por otro lado, el porcentaje de error con menor valor fue para el poder calorífico, cuyos valores son entregados por un laboratorio especializado en este tipo de análisis. Lo anterior, genera confianza en la validación realizada y la leve fluctuación de los resultados es producto que las muestras analizadas en cada ensayo no son iguales, si bien, se ha trabajado con cinco especies forestales, y en una muestra pudo haber mayor cantidad de *Pittosporum Undulatu*, especie que reporta el mayor PC.

Finalizada, descrita y explicada la validación, se cumple el segundo objetivo del presente proyecto que tenía por finalidad evaluar las condiciones de operación del proceso de torrefacción de los residuos forestales. Ahora, el numeral 3.8 se encarga de entregar la información sobre los balances de masa y energía que son pertinentes en el entendimiento de un proceso.

3.8 BALANCES DE MASA Y ENERGÍA

La elaboración de los balances de masa y energía permite contabilizar los flujos de materia y energía durante la torrefacción, así mismo sus requerimientos energéticos. Los valores obtenidos de los balances son la entrada al estudio de viabilidad de un proceso, en este caso, la torrefacción es viable cuando la biomasa adquiere mayor cantidad de energía a la suministrada para mantener el horno a 260°C durante 80 minutos y en rotación.

3.8.1 Balance global de masa. El balance global de masa a través del horno rotatorio a nivel planta piloto se expresa mediante la Ecuación 10.

Ecuación 10. Balance global de materia en el horno rotatorio

$$m_{bo} = m_{bf} + m_g$$

Donde m_{bo} es la masa de biomasa cruda que entra al horno y es calculada durante la alimentación de biomasa cruda al horno

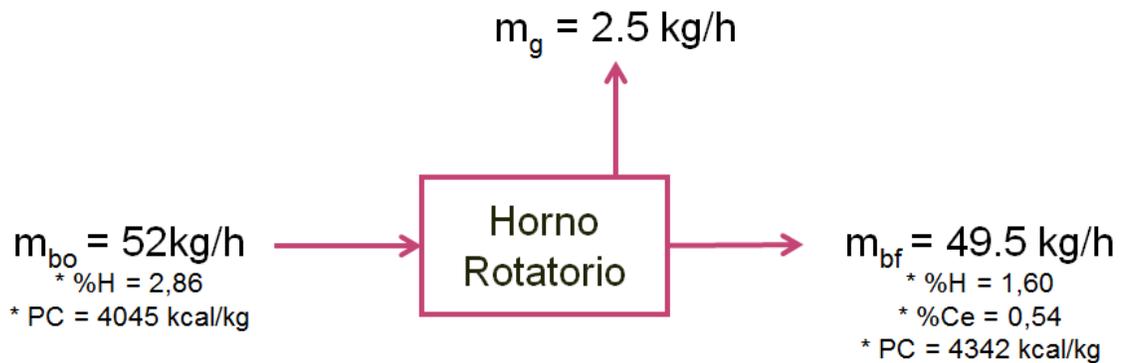
m_{bf} es la masa de biomasa torrefactada que sale del horno y es calculada al pesar la biomasa que sale del horno durante 1 hora

m_g es la masa de humedad y volátiles que sale del horno durante la torrefacción

Se toma como base de cálculo una hora, la cantidad de biomasa cruda que entra al horno es de 52 kg, y el valor de biomasa torrefactada a la salida del horno fue 49,5 kg. La m_g se calcula mediante la diferencia entre m_{bo} y m_{bf} , que da por resultado 2,5 kg.

La Figura 33 reúne de manera clara lo descrito anteriormente.

Figura 33. Esquema de corrientes de materia a través del horno rotatorio



3.8.2 Balance global de energía. El balance global de energía a través del horno rotatorio a nivel planta piloto se expresa mediante la Ecuación 11.

Ecuación 11. Balance global de energía en el horno rotatorio a nivel planta piloto

$$Q_c + Q_{bc} = Q_{bt} + Q_{gc} + Q_p$$

Donde Q_c es la energía del combustible (gas natural)

Q_{bc} es la energía contenida en la biomasa cruda

Q_b es la energía contenida en la biomasa torrefactada al salir del horno

Q_{gc} es la energía de los gases de combustión

Q_p son las pérdidas del sistema

- Energía del combustible. Al igual que en el balance de masa, para los cálculos del balance de energía se toma como base de cálculo una hora, el Q_c se calcula mediante la Ecuación 12.

Ecuación 12. Cálculo de la energía del combustible

$$Q_c = m_{gn} \times PC_{gn}$$

Donde m_{gn} es la masa de combustible utilizada (ver Ecuación 13), es decir, la cantidad de gas natural necesario para generar combustión dentro del horno y garantizar condiciones anaeróbicas junto con la masa necesaria para mantener el horno a 260°C y 80 min. Este valor se obtuvo a través de la lectura del contador de gas en la empresa Tecsol Ltda cuando el único equipo utilizando gas natural era el horno rotatorio (15,88 m³), sin embargo, para efectos del balance se tomó una eficiencia del 68% del gas en la reacción de combustión⁴⁷.

Y PC_{gn} es el poder calorífico del combustible utilizado (gas natural), 5.639 kcal/kg.

Ecuación 13. Cálculo masa de gas natural utilizado en el proceso de torrefacción

$$m_{gn} = v_{lg} \times \rho_{gn} \times e_c$$

Donde v_{lg} es el volumen leído después de una hora de funcionamiento del horno rotatorio, ρ_{gn} es la densidad del gas natural, 0,61 kg/m³, e_c es la eficiencia del gas natural en la reacción de combustión.

Reemplazando los valores en la Ecuación 13, se obtiene:

$$m_{gn} = 15,88m^3 \times 0,61 \frac{kg}{m^3} \times 0,68 = 6,59 kg$$

Ahora, reemplazando los valores en la Ecuación 12 se tiene:

$$Q_c = 6,59 kg \times 5.639 \frac{kcal}{kg} = 37.167,5 kcal$$

⁴⁷ ORDUZ ALADINO, Santiago. Diseño mecánico de horno rotatorio de funcionamiento horizontal. Trabajo de grado en Ingeniería Mecánica. Santiago de Cali: Universidad del Valle, Facultad de Ingenierías, 2012. 88p.

- Energía contenida en la biomasa cruda. Para el cálculo del Q_{bc} se utiliza el valor de PC de la biomasa cruda (4.045 kcal/kg) y la masa alimentada al horno rotatorio por hora (Ver Ecuación 14).

Ecuación 14. Energía del sistema de rotación

$$Q_{bc} = PC_{bc} \times m_{bo}$$

Donde PC_{bc} es el poder calorífico de la biomasa cruda, y m_{bo} es la cantidad de biomasa alimentada al horno (ver numeral 3.8.1)

Entonces, se obtiene

$$Q_{bc} = 4.045 \frac{kcal}{kg} \times 52 kg = 210.340 kcal$$

- Energía contenida en la biomasa torrefactada. El valor de Q_{bt} se obtiene mediante la Ecuación 15.

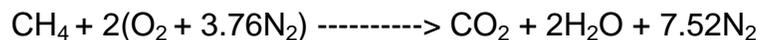
Ecuación 15. Energía que obtiene la biomasa torrefactada

$$Q_{bt} = PC_{bt} \times m_{bf}$$

Donde PC_{bt} es el poder calorífico de la biomasa torrefactada, este valor es entregado por el laboratorio Interlabco, y m_{bf} es la masa de biomasa torrefactada que sale del horno que fue calculada en el balance de masa.

$$Q_{bt} = 4.420 \frac{kcal}{kg} \times 49,5 kg = 218.790 kcal$$

- Energía de los gases de combustión. El Q_{gc} se calcula a partir de la reacción estequiometría de combustión que se muestra a continuación y aplicando la Ecuación 16.



Ecuación 16. Cálculo de la energía de los gases de combustión

$$Q_{gc} = Q_{CO_2} + Q_{H_2O}$$

Donde Q_{CO_2} es la energía del CO_2 (ver Ecuación 17) y Q_{H_2O} es la energía del agua (ver Ecuación 18).

Ecuación 17. Cálculo energía de gases de combustión: CO₂

$$Q_{CO_2} = m_{CO_2} \times Cp_{CO_2} \times (T_{sg} - T_{amb})$$

Donde m_{CO_2} son los moles de CO₂ teniendo en cuenta la estequiometría de la reacción, Cp_{CO_2} es el poder calorífico del CO₂, T_{sg} es la T de salida del CO₂ (medida por un termómetro que tiene el horno a la salida), y T_{amb} es la T ambiente.

Reemplazando los valores en la Ecuación 17 se obtiene:

$$Q_{CO_2} = 532,6 \text{ mol} \times 0,0089 \frac{\text{kcal}}{\text{mol K}} \times (270^\circ\text{C} - 25^\circ\text{C}) = 1.166,3 \text{ kcal}$$

Ecuación 18. Cálculo de energía de gases de combustión: H₂O

$$Q_{H_2O} = [m_{H_2O} \times Cp_{H_2O(l)} \times (T_{eb} - T_{amb})] + [m_{H_2O} \times \Delta h_{vap}] + [m_{H_2O} \times Cp_{H_2O(g)} \times (T_f - T_{eb})]$$

Donde m_{H_2O} son los moles de agua calculada a partir de la estequiometria de la reacción, $Cp_{H_2O(l)}$ es la capacidad calorífica del agua en estado líquido, T_{eb} la T de ebullición del agua, Δh_{vap} la entalpia de vaporización del agua (9,67 kcal/mol), $Cp_{H_2O(g)}$ la capacidad calorífica del agua en estado gaseoso, y T_f la T de salida del agua del horno.

Reemplazando los valores en la Ecuación 18, se obtiene:

$$Q_{H_2O} = \left[1.065 \text{ mol} \times 0,0179 \frac{\text{kcal}}{\text{mol K}} \times (100^\circ\text{C} - 25^\circ\text{C}) \right] + \left[1.065 \text{ mol} \times 9,67 \frac{\text{kcal}}{\text{mol}} \right] + \left[1.065 \text{ mol} \times 0,0079 \frac{\text{kcal}}{\text{mol}} \times (270 - 100) \right]$$

$$Q_{H_2O} = [1.435,8 \text{ kcal}] + [10.310,4 \text{ kcal}] + [1.434,2 \text{ kcal}] = 13.180,2 \text{ kcal}$$

$$Q_{gc} = 1.166,4 \text{ kcal} + 13.180,2 \text{ kcal} = 14.346,7 \text{ kcal}$$

- Perdidas del sistema. Finalmente el Q_p se calcula mediante diferencia, y da como resultado 10.532 kcal.

La Figura 34 representa las corrientes de energía a través del horno rotatorio a nivel planta piloto, y en la Tabla 22 se registra el total de la energía de entrada y salida del equipo.

Figura 34. Esquema de corrientes de energía a través del horno rotatorio

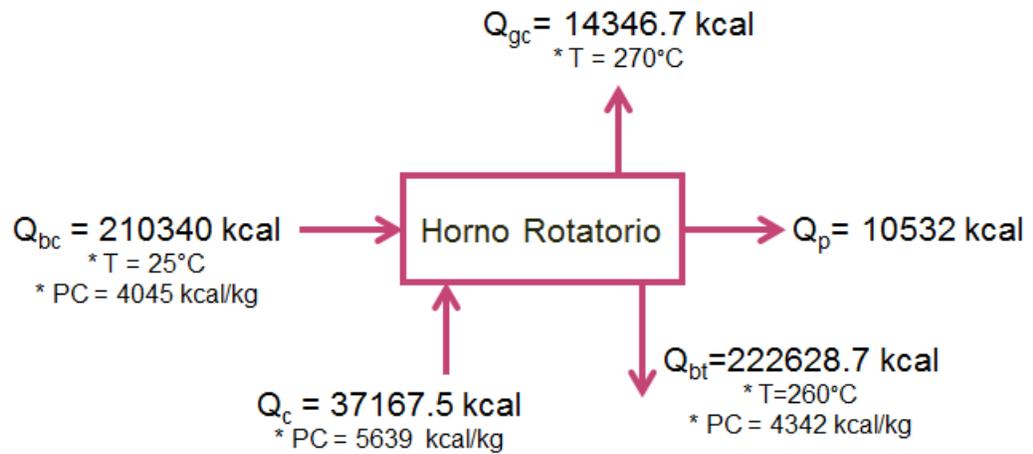


Tabla 22. Comparativo entradas y salidas del horno rotatorio

Q entradas		% participación	Q salidas		% participación
Q c	37.167,50	15,02	Qbt	222.628,73	89,94
Q bc	210.340,00	84,98	Qgc	14.346,69	5,79
			Qp	10.532,10	4,25
total	247.507,50	100		247.507,50	100

Luego de determinar las mejores condiciones de operación y escalar el proceso de torrefacción a nivel planta piloto, se procede a encontrar los costos involucrados en la operación de torrefacción.

4. COSTOS INVOLUCRADOS EN EL PROCESO DE TORREFACCIÓN

Los costos involucrados en la torrefacción de biomasa residual son un factor determinante en la puesta en marcha del proceso, si bien, reflejan y permiten deducir la viabilidad de éste. A continuación se ponen a consideración los costos implicados para llevar a cabo la torrefacción de 52 Kg/h de BR en un horno rotatorio horizontal a nivel planta piloto, y además, los costos de transporte relacionando la cantidad de energía transportada con BR cruda y con BR torrefactada.

4.1 COSTOS DE TRANSPORTE

Desde el inicio del documento se comentó que el transporte a largas distancias de biomasa residual cruda no es rentable debido a las características de ésta (alto porcentaje de humedad, y bajo poder calorífico), razón por la cual se ha destinado este numeral para determinar los costos de transporte de este residuo después de ser sometido al proceso de torrefacción y así presentar la diferencia encontrada con el residuo crudo.

Primero se realiza la suposición del transporte de biomasa (ya sea cruda o torrefactada) desde el Jardín Botánico de Bogotá hasta las instalaciones de la Central Térmica de la Guajira, Termoguajira, en el caso de la biomasa cruda, y desde la planta de Tecsol en Soacha donde se encuentra el horno rotatorio a Termoguajira. La selección de esta planta se realiza de forma aleatoria teniendo en cuenta todas las plantas de generación eléctrica a partir de carbón en Colombia (termoeléctricas) y solo se tiene en cuenta esta clasificación debido a que estas instalaciones son adaptables para ser utilizadas con biomasa, es decir, realizar combustión de biomasa o co-combustión de carbón y biomasa.

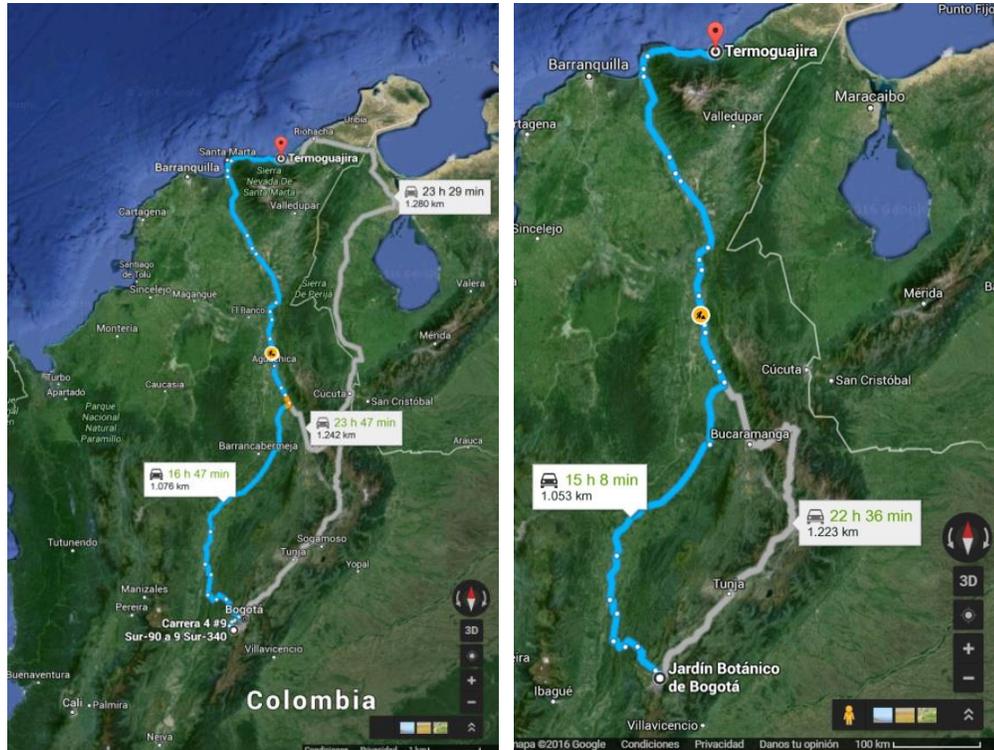
Termoguajira se encuentra ubicada a 6 kilómetros del corregimiento de Mingueo en el municipio de Dibulla (departamento de la Guajira)⁴⁸. Esta central genera 302 MW/h de energía eléctrica, donde se utiliza carbón como combustible principal y gas natural como combustible secundario.⁴⁹

En la Figura 35 se presenta la ruta que debe a travesar la volqueta que va a ir cargada de biomasa residual cruda o torrefactada sea el caso de estudio.

⁴⁸ GECELCA. Generadora y comercializadora de energía del caribe S.A E.S.P. Oficinas Administrativas. Termoguajira. [citado el 6 de Mayo de 2016] Disponible en internet: <<https://www.gecelca.com.co/index.php/empresa/ubicacion>>.

⁴⁹ LONDOÑO, Juan José. Video Termoguajira 2011.2012

Figura 35. Trayecto Planta de torrefacción- Termoguajira (izquierda) y Jardín Botánico de Bogotá – Termoguajira (derecha)



En los numerales 4.1.1 y 4.1.2 se presentan los cálculos de transporte para la biomasa residual cruda y torrefactada respectivamente, para ello se realizó la cotización del valor total del transporte, de donde se entrega una relación de \$1200 m³/km para transporte de carga a todo el país y de \$950 m³/km en el casco urbano (Ver Anexo E).

La volqueta designada para el transporte de biomasa residual tiene una capacidad de volcú de 18 m³, o 28.500 kg, a partir de estos valores se realiza el cálculo del costo de transporte (ver Ecuación 19).

Ecuación 19. Costo de transporte de biomasa residual

$$C = c_v \times d_r \times r_t$$

Donde c_v es la capacidad de volcú de la volqueta utilizada

d_r es la distancia recorrida

r_t relación de pesos por metro cúbico de BR transportada

Reemplazando en la Ecuación 19 los datos para el trayecto JBB- Termoguajira, cuya distancia recorrida es de 1.053 (ver Figura 35), se obtiene:

$$C = 18 \text{ m}^3 \times 1.053 \text{ km} \times \$1.200 \frac{\text{m}^3}{\text{km}} = \$22'744.800$$

El valor de \$22'744.800 corresponde al costo del transporte de biomasa cruda hasta Termoguajira realizado por una sola volqueta, el costo de transporte de BR torrefactada es de \$23'131.260, este último valor es mayor dado que está involucrado el traslado de la biomasa desde el JBB a la planta de torrefacción en Soacha y desde allí a Termoguajira.

4.1.1 Residuos forestales crudos. A continuación se entrega la cantidad de energía transportada contenida en biomasa residual cruda haciendo uso de la volqueta nombrada anteriormente; el cálculo se realiza utilizando la Ecuación 20.

Ecuación 20. Cálculo energía transportada contenida en biomasa cruda

$$E_{bc} = m_{tbc} \times PC_{bc}$$

Donde E_{bc} es la energía contenida en la biomasa cruda
 m_{tbc} es la cantidad de masa transportada de biomasa cruda
 PC_{bc} poder calorífico de la biomasa cruda (ver Anexo A)

La m_{tbc} se calcula a partir de la densidad de la biomasa cruda que es igual a 403,7 kg/m³, el procedimiento seguido fue tomar un trozo de biomasa residual cruda y tomar el valor de la masa, después utilizar una probeta con agua para sumergir la partícula y observar la cantidad de agua desplazada.

Reemplazando en la Ecuación 20 se obtiene:

$$E_{bc} = 7.185,27 \text{ kg} \times 4.045 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}} = 29,06 \text{ Gcal}$$

4.1.2 Residuos forestales torrefactados. El costo de transporte de BR torrefactada es más costoso que el de la BR cruda, si bien, la BR debe ser transportada inicialmente desde el JBB a la planta de torrefacción en Soacha, y de allí, ser llevada a Termoguajira. Aplicando la Ecuación 19 para el trayecto JBB-Soacha (casco urbano) cuya distancia recorrida es 22,1 km, el valor de transporte es \$377.910 y para el trayecto Soacha-Termoguajira (distancia recorrida 1.076 km) es de \$23'241.600, dando un total de transporte de \$23'619.510.

Ahora, se calcula la energía transportada contenida en la biomasa torrefactada, a partir de los datos de la volqueta utilizada para la BR cruda. (Ver Ecuación 21)

Ecuación 21. Cálculo energía transportada contenida en la biomasa torrefactada

$$E_{bt} = m_{tbt} \times PC_{bt}$$

Donde E_{bt} es la energía contenida en la biomasa torrefactada
 m_{tbt} es la cantidad de masa transportada de biomasa torrefactada
 PC_{bt} poder calorífico de la biomasa torrefactada (ver Anexo B)

La m_{tbt} se calcula igual que la m_{tbc} con la diferencia que ahora se utiliza un trozo de biomasa torrefactada, el valor obtenido es $641,5 \text{ kg/m}^3$

Ahora, se calcula la energía transportada contenida en la biomasa torrefactada, a partir de los datos de la volqueta utilizada para la BR cruda. Reemplazando en la Ecuación 21 se obtiene:

$$E_{bt} = 11.418,7 \text{ kg} \times 4.420 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}} = 50,47 \text{ Gcal}$$

Lo anterior, demuestra una diferencia entre la cantidad de energía que se transporta con biomasa torrefactada frente a la transportada con biomasa cruda, igual a 21,4 Gcal, es decir, un porcentaje de desviación de 73%.

4.2 COSTOS ENERGÉTICOS

A continuación se describen y se calcula el gasto energético del horno rotatorio a nivel planta piloto y la cantidad de biomasa necesaria para producir un kWh, valor utilizado posteriormente para estimar un valor de kWh a partir de biomasa residual torrefactada.

4.2.1 Gasto energético del horno rotatorio a nivel planta piloto. El gasto energético se determina a partir de los equipos y el combustible que se alimenta al horno rotatorio y permiten su funcionamiento. El combustible utilizado es gas natural el cual se alimenta al quemador y, entre los equipos se encuentra el quemador, que funciona a partir de energía eléctrica al igual que el sistema de rotación del horno.

- Gasto energético del combustible. El gasto energético del combustible, es decir, del gas natural se determina de acuerdo a la siguiente relación: Ver Ecuación 22. Los gastos energéticos se realizan con base de cálculo de 1 hora.

Ecuación 22. Cálculo del gasto energético proveniente del gas.

$$\text{Gasto energetico del combustible (kcal)} = \text{Masa gas(kg)} * PC \text{ gas} \left(\frac{\text{kcal}}{\text{kg}} \right)$$

Se determina primero el volumen de gas consumido durante una hora mediante la diferencia entre el valor leído en el medidor de gas en un tiempo cero y después de 1 hora (valor que corresponde a $15,8 \text{ m}^3$); con este volumen se encuentra la

masa de gas haciendo uso de la densidad (0,61 kg/m³)⁵⁰; el valor de la masa de gas encontrado es de 9,7 Kg.

El poder calorífico del gas se encuentra en la página de Gas Natural Fenosa, proveedora del gas natural utilizado en el quemador, este valor corresponde a 15.059,6 kcal/kg⁵¹.

Por lo tanto, el gasto energético encontrado por uso de combustible es de 146.077,75 kcal por cada hora de funcionamiento.

- Gasto energético del quemador. La energía consumida por el quemador para el funcionamiento del mismo se determina por medio de la Ecuación 23.

Ecuación 23. Cálculo del gasto energético ejercido por el quemador

$$\text{Gasto por el quemador (kJ)} = \frac{\text{Voltaje (V)} * \text{Amperaje (A)} * \text{Tiempo(s)}}{1000}$$

Los datos de voltaje y amperaje son determinados por las características del equipo (24V y 0,2A); la base de cálculo sigue siendo 1 hora (3600 s).

El gasto ejercido por el funcionamiento del quemador corresponde a 17,28 kJ (4,13 kcal) por cada hora de funcionamiento.

- Gasto energético del sistema de rotación. El gasto energético ejercido por el sistema de rotación del horno se calcula de acuerdo a la potencia del rotor que corresponde a 1HP (745,69 J/s). A continuación se describe la ecuación que se utiliza para el cálculo (Ver Ecuación 24).

Ecuación 24. Cálculo del gasto energético ejercido por el sistema de rotación.

$$\text{Gasto por rotacion (kJ)} = \text{Potencia} \left(\frac{\text{J}}{\text{s}} \right) * \text{Tiempo (s)}$$

Reemplazando los valores en la Ecuación 24 se obtiene que el gasto ejercido por la rotación del horno es de 2.684,51 kJ (178,1 kcal) por cada hora de uso.

⁵⁰ AIR LIQUIDE. Enciclopedia de gases. Metano. [citado el 4 de Mayo de 2016]. Disponible en internet:

<<http://encyclopedia.airliquide.com/encyclopedia.asp?LanguageID=9&CountryID=19&Formula=&GasID=41&UNNumber=&EquivGasID=73&RD20=29&RD9=8&RD6=64&RD4=2&RD3=22&RD8=27&RD2=20&RD18=41&RD7=18&RD13=71&RD16=35&RD12=31&RD19=34&RD24=62&RD25=77&RD26=78&RD28=81&RD29=82#GeneralData>>.

⁵¹ GAS NATURAL FENOSA. ¿Qué es?. [citado el 4 de Mayo de 2016]. Disponible en internet: <<http://www.gasnaturalfenosa.com.co/co/hogar/el+gas+natural/1297102453941/que+es.html>>.

Teniendo en cuenta el gasto energético del combustible, el quemador, y el sistema de rotación, se obtiene un gasto energético del horno total igual a 146.260 kcal.

4.2.2 Cantidad de Biomasa para generar 1 kWh de energía. Dados los poderes caloríficos de la biomasa cruda (4.045 kcal/Kg) y de la biomasa torrefactada a las condiciones seleccionadas de 260°C y 80 minutos como tiempo de residencia (4.420 kcal/Kg), se encuentra la cantidad de biomasa para producir 1 kWh de energía.

Para calcular la cantidad de masa para producir un kWh, se utiliza la conversión de Kwh a kcal como se muestra en la Ecuación 25.

Ecuación 25. Conversión de kWh a kcal⁵²

$$1kWh = \frac{238,8459 \text{ cal}}{1 \text{ s}} * \frac{3600 \text{ s}}{1 \text{ h}} = 859.845,2 \text{ cal} = 859,8 \text{ kcal}$$

Dado lo anterior, se calcula los kilogramos de biomasa necesarios para generar 1 kWh (Ver Ecuación 26).

Ecuación 26. Cálculo de los kilogramos de biomasa para generar 1 kWh

$$\text{Kilogramos de biomasa} = \frac{859,8452 \text{ kcal}}{PC \left(\frac{\text{kcal}}{\text{Kg}} \right)}$$

Reemplazando los valores en la Ecuación 26 se tiene que la cantidad de biomasa cruda necesaria para generar 1 kWh es de 0,212 Kg y la cantidad de biomasa torrada necesaria para generar 1 kWh es de 0,194 Kg.

Se observa en los resultados obtenidos que es necesaria menor cantidad de biomasa torrefactada para generar 1kWh en comparación con la cantidad de biomasa cruda necesaria para producir los mismos kWh, por tanto hay una diferencia de un 8% entre los kilogramos de biomasa cruda y biomasa torrada y, la relación biomasa torrada – biomasa cruda es de 0,91.

⁵² WIKIPEDIA. Vatio-hora- [citado el 6 de Mayo de 2016]. Disponible en internet: <<https://es.wikipedia.org/wiki/Vatio-hora>>.

4.3 ESTIMACIÓN DEL PRECIO DEL KWH A PARTIR DE BIOMASA TORREFACTADA

El propósito de este numeral es estimar el precio de un kWh a partir de biomasa torrefactada a partir de los costos OPEX (ver Tabla 24), y los kWh producidos por día, teniendo en cuenta que el horno rotatorio horizontal a nivel planta piloto funciona 8 horas por día, no obstante, los costos de inversión (CAPEX) no son tenidos en cuenta pero se relacionan en la Tabla 23, los precios son entregados por el Ingeniero Pedro Guevara y su grupo de trabajo quienes diseñaron, construyeron e instalaron el horno rotatorio, y además están a cargo del funcionamiento de éste.

Tabla 23. Costos CAPEX

Descripción	valor individual (\$)	valor total (\$)
fabricación del horno rotatorio	\$10'000.000	\$10'000.000
instalación del horno rotatorio	\$1'000.000	\$1'000.000
horno de secado	\$4'000.000	\$4'000.000
total		\$15'000.000

Tabla 24. Costos OPEX

Descripción	valor individual (\$/día)	valor total (\$/día)
combustible, gas natural	\$199.017	\$199.017 ⁵³
mano de obra (2 operarios)	\$40.000	\$80.000
mantenimiento (correctivo)	\$3.333	\$3.333
Transporte-recolección de biomasa	\$13.923	\$6'961.434 ⁵⁴
almacenamiento	\$33.333	\$33333
total		\$7'277.118

⁵³ Valor obtenido a partir del consumo de gas del horno rotatorio y el precio de m³ relacionado en la factura de gas (Ver Anexo F)

⁵⁴ Valor obtenido a partir de la relación de transporte trabajada (Ver Anexo E) y la cantidad de biomasa residual necesaria para torrefactar por día.

A continuación, en la Tabla 25, se muestran los parámetros necesarios para calcular el precio del kWh a partir de biomasa residual forestal, sin tener en cuenta los costos de inversión. Para ello, se calculan los kWh producidos en un día con biomasa torrefactada.

Tabla 25. Parámetros para calcular el precio del kWh a partir de biomasa

Parámetro	Valor
Conversión kWh-Kcal (kcal)	859,85
PC biomasa torrefactada (kcal/kg)	4.342
Masa BR torrefactada para producir un kWh (Kg)	0,19
Densidad biomasa torrefactada (kg/m ³)	641,50
Masa de BR alimentada al horno por día (kg)	416
kWh producidos por hora (kWh)	245
volumen transportado (m ³)	1,3
Costo transporte de 1 m ³ /km (\$)	950
Distancia JBB-Soacha (km)	22,60
transporte (\$)	27.846
kWh producidos por día (8 horas) (kWh)	1.999,68

La Tabla 25 reporta una producción de 1999.68 kWh en un día con trabajo de 8 horas, a partir de este valor y mediante la relación de que producir 1.999,68 kWh cuesta \$258.071 (ver Tabla 24) por día, la producción de 1 kWh cuesta \$129.

Se recuerda que el valor de \$129 por kWh de biomasa es una estimación, por el hecho, de no haberse tenido en cuenta la inversión inicial, y en general, no realizarse la evaluación financiera pertinente.

En Colombia la energía se obtiene a partir de diferentes fuentes, entre ellas se encuentran: las hidroeléctricas, carbón, gas, y líquidos registrando un valor por kWh de \$40, \$140, \$235 y, entre \$480 y \$1.000 respectivamente⁵⁵; lo anterior indica que el valor obtenido de \$129/kWh a partir de biomasa se encuentra en medio de los ofrecidos en el mercado, pudiendo ser esta última un posible recurso renovable con potencial en la generación termoeléctrica.

4.4 VIABILIDAD EN TÉRMINOS ENERGÉTICOS DEL PROCESO DE TORREFACCIÓN COMO MÉTODO DE DENSIFICACIÓN ENERGÉTICA

Con el fin de determinar la viabilidad en términos energéticos del proceso de torrefacción se tiene en cuenta el gasto energético para producir biomasa residual durante 1 hora vs. la energía que contiene la biomasa torrefactada durante esa

⁵⁵ DINERO. ¿Por qué es tan cara la energía en Colombia?. [citado el 14 de Junio de 2016] Disponible en internet: <<http://www.dinero.com/pais/articulo/costos-energia-colombia/212216>>

misma hora, es decir, si la energía contenida en la BR torrada es mayor al gasto energético del proceso, se dice que el proceso es viable energéticamente (ver Ecuación 27).

La torrefacción de 52 kg/h de BR cruda tiene un gasto energético de 146.260 kcal (ver numeral 4.2.1), de este proceso se genera 49,5 kg/h de biomasa torrada (ver numeral 3.8.1), con un poder calorífico de 4.420 kcal/kg, dando como resultado 218.790 kcal contenidas en la BR torrada.

Ecuación 27. Relación gasto energético – energía contenida en la BR torrefactada

$$\text{Gasto Energético} < \text{Energía contenida en la BR torrefactada}$$

Donde la energía contenida en la BR torrefactada corresponde al producto entre la masa que sale del horno y su poder calorífico. Cabe aclarar que estos cálculos se realizan utilizando los datos a las condiciones de operación determinadas en el capítulo 3.

Dado lo anterior, la biomasa torrada genera más energía de la que consumen los equipos para producirla, con una diferencia de 72.530 kcal, esto quiere decir que el proyecto en términos energéticos es viable, no obstante, se recomienda realizar la evaluación financiera para determinar la competitividad del producto en un posible mercado como energía renovable.

5. CONCLUSIONES

- La biomasa forestal cruda estudiada es un residuo que presenta pobres propiedades energéticas, con un poder calorífico de 4.045 kcal/kg y humedad del 7%, pero con grandes ventajas debido a la disponibilidad durante largos periodos de tiempo en regiones de la zona ecuatorial.
- La torrefacción funciona como método de densificación energética de residuos forestales, dado que en las condiciones de operación seleccionadas su poder calorífico incrementa en un 9,27%, el porcentaje de humedad disminuye en un 35%, con un porcentaje de cenizas de 0,66% y, además se evidencia un comportamiento hidrofóbico. Se resalta que la tecnología utilizada durante el proceso experimental fue un horno rotatorio horizontal a nivel laboratorio y planta piloto.
- El tiempo de residencia, temperatura de torrefacción y tamaño de partícula ideales para llevar a cabo la torrefacción de residuos forestales en un horno rotatorio horizontal fueron de 80 minutos, 260°C y una astilla de medidas promedio de 0,56 cm, 3,44 cm y 1,84 cm de alto, largo y ancho respectivamente. El color obtenido para la BR torrefactada fue marrón, esto indica que no se excedió la temperatura ni el tiempo de residencia durante el proceso y que la BR no paso a la etapa de carbonización. Por otro lado, la metodología de multicriterios ponderados utilizada para las priorizaciones funcionó satisfactoriamente con el apoyo de la experticia del Ingeniero Pedro Guevara, quien aportó para la determinación de los pesos y confirmó la decisión para cada uno los criterios establecidos en las mencionadas priorizaciones.
- Los costos calculados al realizar la torrefacción de 52 kg/h de residuos forestales a nivel planta piloto a las condiciones establecidas, determinó que el transporte durante largas distancias (como el supuesto en el trabajo Bogotá-Termoguajira), mejora su rentabilidad al transportar 50,47 *Gcal* que corresponde a la energía contenida en la biomasa torrefactada, en vez de 29,06 *Gcal* que corresponde a la biomasa cruda; teniendo en cuenta que el precio del transporte es el mismo tanto para la BR cruda como para la BR torrada. Por otro lado, el proceso de torrefacción es viable energéticamente al determinarse que la energía contenida en la biomasa torrada es 218.790 kcal y el gasto energético de los equipos involucrados en su producción de 146.260 kcal, teniendo así una relación de 1,49 (biomasa torrada/gasto energético).
- El precio de kilowatio hora estimado a partir de biomasa residual a nivel planta piloto, \$129/kWh, refleja que este residuo puede ser utilizado en la generación de energía, dado que el valor obtenido se encuentra en medio de los ofrecidos

hoy en día, entre ellos, hidroeléctrica: \$40/kWh, carbón: \$140/kWh y gas: \$235/kWh, no obstante, se habla de una estimación al no haberse tenido en cuenta algunos criterios como costos CAPEX.

6. RECOMENDACIONES

- Evaluar el proceso de torrefacción con diferentes tecnologías, como un reactor de torrefacción de lecho móvil, lecho fluidizado, tambor rotatorio, tornillo, hogares múltiples, entre otros.
- Evaluar y comparar las propiedades energéticas del carbón u otros combustibles fósiles con las propiedades energéticas de la biomasa residual torrefactada para analizar las ventajas de esta última en un posible mercado de generación de energía.
- Determinar y analizar otras propiedades de la biomasa residual cruda y torrefactada como su composición química (celulosa, hemicelulosa, lignina), carbono fijo, materia volátil, entre otros, que pueden ser útiles en la determinación de las condiciones de operación del proceso de torrefacción.
- Realizar estudios de torrefacción utilizando otras biomásas residuales entre las cuales se encuentran diferentes especies forestales, como las de madera dura, las cuales presentan un poder calorífico superior a las de las maderas blandas; además de biomásas residuales agrícolas y residuos sólidos urbanos.
- Analizar el proceso de generación de energía con biomasa residual torrefactada haciendo uso de la tecnología adecuada dado que dependiendo el tipo de biomasa sea agrícola, forestal o residuos sólidos urbanos, la tecnología para generación térmica es diferente.
- Realizar una evaluación financiera para determinar el precio de un kWh a partir de biomasa teniendo en cuentas los costos OPEX y CAPEX para el proceso de torrefacción.
- Estudiar y analizar el proceso de torrefacción junto a otros procesos de densificación como el pelletizado y briqueteo.
- Estudiar y determinar las emisiones producidas durante el transporte de la biomasa torrefactada desde la planta de torrefacción hasta la planta de generación termoeléctrica dado que es un factor importante en la viabilidad de un proyecto con perfil ambiental.
- Determinar los elementos y compuestos que se encuentran en las cenizas de la biomasa torrefactada, con el fin de realizar el manejo pertinente y la disposición final de éstas.

- Realizar el estudio de exportación de biomasa torrefactada desde Colombia a las grandes plantas termoeléctricas europeas a partir de biomasa residual forestal, como en Reino Unido o Finlandia, debido a que su ubicación geográfica y presencia de estaciones hacen que la biomasa residual sea escasa durante ciertos periodos de tiempo.

BIBLIOGRAFÍA

AIR LIQUIDE. Enciclopedia de gases. Metano. [citado el 4 de Mayo de 2016]. Disponible en internet: <<http://encyclopedia.airliquide.com/encyclopedia.asp?LanguageID=9&CountryID=19&Formula=&GasID=41&UNNumber=&EquivGasID=73&RD20=29&RD9=8&RD6=64&RD4=2&RD3=22&RD8=27&RD2=20&RD18=41&RD7=18&RD13=71&RD16=35&RD12=31&RD19=34&RD24=62&RD25=77&RD26=78&RD28=81&RD29=82#GeneralData>>.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. Standard Test Methods for Proximate Analysis of Coal and Coke by Macro Thermogravimetric Analysis. ASTM D7582, Pensilvania, 2012. 9p.

ANÓNIMO. Propiedades físicas de algunos líquidos típicos. [citado el día 4 de mayo de 2016]. Disponible en internet: <<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/tables/liqprop.html>>

BROWN, Theodore. Química, la ciencia central. Decimoprimer edición. Pearson Education, México, 2009. Apéndice G, Pág. G7

BURITICÁ, Clara, *et al.* Formulación De Instrumentos Técnicos Que Estimulen El Aprovechamiento De La Biomasa En La Generación De Energía a Partir De Fuentes no Convencionales De Energía – FNCE, Producto 2 Soporte Técnico y Jurídico Para El Aprovechamiento Energético De La Biomasa Residual En Colombia. UPME, Udistrital, Minambiente. 2015.

BYEONG-IL, Na; BYOUNG-JUN, Ahn; JAE-WON, Lee. Changes in chemical and physical properties of yellow poplar (*Liriodendron tulipifera*) during torrefaction. 2014. DOI 10.1007/s00226-014-0697-1

CAMPS, Manuel. Los Biocombustibles: colección energías renovables. 2 ed. Madrid: Ediciones mundi-prensa, 2008. 383 p.

CENTER FOR DISEASE CONTROL AND PREVENTION. CELLULOSE. [citado el 05 de mayo de 2016]. Disponible en internet: <<http://www.cdc.gov/niosh/npg/npgd0110.html>>

COLOMBIA. CONGRESO DE LA REPUBLICA. Ley 1715 (13, mayo, 2014). Por medio de la cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al sistema energético nacional. Diario oficial. Bogotá D.C., 2014. no. 49150. 26 p

CONSORCIO ENERGETICO CORPOEMA. Formulación De Un Plan De Desarrollo Para Las Fuentes no Convencionales De Energía En Colombia (PFDNCE). Bogotá, Colombia. 2010.

DISTRENDS PLANETA SUSTENTABLE. ¿Qué Es Torrefacción De La Biomasa?. [citado el 4 de mayo de 2015]. Disponible en internet: <https://distrends.com/que-es-torrefaccion-de-la-biomasa/>

DINERO. ¿Por qué es tan cara la energía en Colombia?. [citado el 14 de Junio de 2016] Disponible en internet: <http://www.dinero.com/pais/articulo/costos-energia-colombia/212216>>

ENDESA EDUCA. Centrales De Biomasa. [citado el 05 de abril de 2016]. Disponible en internet: http://www.endsaeduca.com/Endesa_educa/recursos-interactivos/produccion-de-electricidad/xiv.-las-centrales-de-biomasa>

GAS NATURAL FENOSA. ¿Qué es?. [citado el 4 de Mayo de 2016]. Disponible en internet: <http://www.gasnaturalfenosa.com.co/co/hogar/el+gas+natural/1297102453941/que+es.html>>.

GECELCA. Generadora y comercializadora de energía del caribe S.A E.S.P. Oficinas Administrativas. Termoguajira. [citado el 6 de Mayo de 2016] Disponible en internet: <https://www.gecelca.com.co/index.php/empresa/ubicacion>>.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TECNICAS Y CERTIFICACIÓN. Documentación. Presentación de tesis, trabajos de grado y otros trabajos de investigación. NTC 1486. Sexta actualización. Bogotá: El Instituto, 2008, p. 1-42

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TECNICAS Y CERTIFICACIÓN. Referencias bibliográficas, contenido, forma y estructura. NTC 5613. Bogotá: El Instituto, 2008, p.1-38

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TECNICAS Y CERTIFICACIÓN. Referencias documentales para fuentes de informaciones electrónicas. NTC 4490. Bogotá: El Instituto, 1998, p.1-27

LIPPEL. Briquetaje y Peletización. [citado el 19 de Julio de 2016]. Disponible en: <http://siteantigolippel.hospedagemdesites.ws/es/sustentabilidad/briquetaje-y-peletizacion.html#.V4-dabjhChc>>

LONDOÑO, Juan José. Video Termoguajira 2011.2012

MURPHY, W. K. y MASTERS, K. R. Gross heat of combustion of northern red oak (*Quercus rubra*) chemical components. 1978. Wood Sci. 10:139-141.

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 en Ingeniería Química. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2008. 101 p.

PEREIRA, Orlando. Matriz Multicriterio Ponderada. 12 de Mayo de 2015. [citado el 16 de Mayo de 2016]. Disponible en internet: <<http://administraciont3t2.blogspot.com.co/2015/05/matriz-multicriterio-ponderada.html>>

PHANPHANICH, Manunya y MANI, Sudhagar. Impact of torrefaction on the grindability and fuel characteristics of forest biomass. 2011. DOI 10.1016/j.biortech.2010.08.028

PRINSEN, Pepijn. Composición química de diversos materiales lignocelulósicos de interés industrial y análisis estructural de sus ligninas. Sevilla, 2010. Tesis de Maestría en Estudios avanzados en química. Universidad de Sevilla, Facultad de química. 82 p.

PROEXPORT COLOMBIA. Sector Forestal En Colombia. [citado el 05 de noviembre de 2015]. Disponible en internet: <http://www.inviertaencolombia.com.co/Adjuntos/Perfil_Forestal_2012.pdf>

RÄISÄNEN, Tommi y ATHANASSIADIS, Dimitris. Basic chemical composition of the biomass components of pine, spruce and birch [en línea]. Botnia- Atlántica: forest refine, enero 2013 [citado el 15 de Abril de 2016] Disponible en internet: <http://www.biofuelregion.se/UserFiles/file/Forest%20Refine/1_2_IS_2013-01-31_Basic_chemical_composition.pdf>

REUNIÓN CIENTÍFICA DE LA SEEP. (XLV: 30-3, de Mayo- Junio, 2005: Gijón, España). Determinación de lignina y celulosa en hojas de plantas leñosas mediante NIRS: comparación de métodos estadísticos. Instituto nacional de investigación y tecnología agraria y alimentaria. Gijón. 2005. 8 p.

RINCON, J., *et al.* Bioenergía: Fuentes, Conversión y Sustentabilidad. Bogotá: La red iberoamericana de aprovechamiento de residuos orgánicos en producción de energía, Colombia. 2014.

ROYO, Javier; CANALÍS, Paula; SEBASTIAN, Fernando. Co-combustión. [citado el día 19 de mayo de 2016]. Disponible en internet: <http://api.eoi.es/api_v1_dev.php/fedora/asset/eoi:45272/componente45271.pdf>

SHAWAQFEH, Ahmad. Isobaric Vapor–liquid equilibrium for the binary system Diisopropylether + Isopropanol at 95 kPa. 2010.

WIKIPEDIA. Cellulose. [citado el 5 de mayo de 2016]. Disponible en internet: <<https://en.wikipedia.org/wiki/Cellulose>>

WIKIPEDIA. Vatio-hora- [citado el 6 de Mayo de 2016]. Disponible en internet: <<https://es.wikipedia.org/wiki/Vatio-hora>>.

ANEXOS

ANEXO A
**RESULTADO DE ANÁLISIS DE PODER CALORÍFICO PARA MUESTRA DE
 BIOMASA RESIDUAL CRUDA**



Interlabco S.A.S.
 LABORATORIO QUÍMICO INTERNACIONAL

Código: FT034/V04
Página: 1 de 1
Vigente desde: 26 - Feb - 12

Villa de San Diego de Ubaté, 27 de Abril de 2016

Ref. 45813
 O.T. 15331

Señores
INDUSTRIAS TECSOL LTDA
 Ciudad

CERTIFICADO DE CALIDAD
*¡Mejoramos continuamente!
 Conocimiento, Información e Inteligencia
 al servicio de nuestros clientes*

Nosotros, INTERLABCO S.A.S., certificamos que hemos PREPARADO Y ANALIZADO una (1) muestra(s)
 de BIOMASA, recibida(s) el día 26 de Abril de 2016 a las 16:30 horas,
 y los resultados obtenidos son los siguientes según normas ASTM.

IDENTIFICACION: MUESTRA 1
FECHA DE ANALISIS: ABRIL 27 DE 2016

DETERMINACIÓN	COMO SE RECIBE	BASE SECA	METODO ASTM
HUMEDAD TOTAL, %	6,98		D 3302/D3302M - 12
PODER CALORIFICO, Kcal/Kg	3763	4045	D 5865 - 11a

Luz Dary Ortiz
LUZ DARY ORTIZ
 Inspector de Calidad
 Firma Autorizada



Carlos Javier Obando
CARLOS JAVIER OBANDO
 Inspector de Calidad
 Firma Autorizada

NOTA 1: Los resultados analíticos corresponden única y exclusivamente a la(s) muestra(s) (muestras) y LABORATORIO y no a otra(s) de la misma procedencia.
 NOTA 2: Los resultados expresados en el certificado corresponden a las circunstancias y condiciones particulares del momento en que se analiza la muestra.
 NOTA 3: INTERLABCO S.A.S. no se hace responsable por los perjuicios derivados del uso indebido del presente certificado por parte del cliente.
 NOTA 4: La muestra de reserva se conserva en INTERLABCO S.A.S. durante 30 días calendario después de los cuales será desechada, igualmente se aceptará cualquier aclaración sobre los resultados emitidos única y exclusivamente durante este periodo.
 NOTA 5: Si se detecta en este certificado alteración de resultados, tipo de letra, fecha u otra anomalía, comuníquese con INTERLABCO S.A.S para verificar autenticidad.
 NOTA 6: El Laboratorio no es responsable de las posibles interpretaciones surgidas por la reproducción parcial del presente certificado.

ANEXO B
RESULTADOS DE ANÁLISIS DE PODER CALORÍFICO PARA 9 MUESTRAS DE BIOMASA TORREFACTADA A DIFERENTES CONDICIONES DE OPERACIÓN

En la Tabla 26 se realiza la identificación de muestras de acuerdo a las condiciones de temperatura y tiempo de residencia, con su respectivo poder calorífico.

Tabla 26. Identificación de muestras.

Muestra	Condiciones	PC (kcal/kg)
1	240°C – 80 minutos	4378
2	240°C – 60 minutos	4268
3	240°C – 40 minutos	4006
4	260°C – 40 minutos	4180
5	260°C – 60 minutos	4305
6	260°C – 80 minutos	4420
7	280°C – 80 minutos	4338
8	280°C – 60 minutos	4325
9	280°C – 40 minutos	4287



Interlabco S.A.S.

LABORATORIO QUÍMICO INTERNACIONAL

Código: FT034/V04
Página: 1 de 1
Vigente desde: 26 - Feb - 12

Villa de San Diego de Ubaté, 22 de Abril de 2016

Ref. 45784
O.T. 15316

Señores
INDUSTRIAS TECSOL LTDA
Ciudad

CERTIFICADO DE CALIDAD

*¡Mejoramos continuamente!
Conocimiento, Información e Inteligencia
al servicio de nuestros clientes*

Nosotros, INTERLABCO S.A.S., certificamos que hemos PREPARADO Y ANALIZADO una (1) muestra(s) de BIOMASA TORREFACTADA, recibida(s) el día 21 de Abril de 2016 a las 12:30 horas, y los resultados obtenidos son los siguientes según normas ASTM.

IDENTIFICACION: MUESTRA 1
FECHA DE ANALISIS: ABRIL 22 DE 2016

RESULTADOS

DETERMINACIÓN	COMO SE RECIBE	BASE SECA	METODO ASTM
HUMEDAD TOTAL, %	5,14		D 3302/D3302M - 12
PODER CALORIFICO, Kcal/Kg	4153	4378	D 5865 - 11a

LUZMARY ORTIZ
Inspector de Calidad
Firma Autorizada

Ing. C. EDILMIRA PEÑA DE ARCO
Gerente General y Operativa
M.P. 1334

CARLOS JAVIER OBANDO
Inspector de Calidad
Firma Autorizada

NOTA 1: Los resultados analíticos corresponden única y exclusivamente a 100 muestras analizadas en el LABORATORIO y no a otras de la misma procedencia.
NOTA 2: Los resultados expresados en el certificado corresponden a las circunstancias y condiciones particulares del momento en que se analizó la muestra.
NOTA 3: INTERLABCO S.A.S. no se hace responsable por los perjuicios derivados del uso indebido del presente certificado por parte del cliente.
NOTA 4: La muestra de reserva se conserva en INTERLABCO S.A.S. durante 30 días calendario después de los cuales será destruida; igualmente se aceptará cualquier reclamo sobre los resultados emitidos antes y exclusivamente durante este período.
NOTA 5: Si se detecta en este certificado alguna(s) anomalía(s) de resultados, tipo de letra, fecha u otra anomalía, comuníquese con INTERLABCO S.A.S para verificar autenticidad.
NOTA 6: El Laboratorio no es responsable de las posibles interpretaciones surgidas por la reproducción parcial del presente certificado.



Interlabco S.A.S.

LABORATORIO QUÍMICO INTERNACIONAL

Código: FT034/V04
Página: 1 de 1
Vigente desde: 26 - Feb - 12

Villa de San Diego de Ubalá, 22 de Abril de 2016

Ref. 45785
O.T. 15316

Señoras
INDUSTRIAS TECSOL LTDA
Ciudad

CERTIFICADO DE CALIDAD

*¡Mejoramos continuamente!
Conocimiento, Información e Inteligencia
al servicio de nuestros clientes*

Nosotros, INTERLABCO S.A.S., certificamos que hemos PREPARADO Y ANALIZADO una (1) muestra(s) de BIOMASA TORREFACTADA, recibida(s) el día 21 de Abril de 2016 a las 12:30 horas, y los resultados obtenidos son los siguientes según normas ASTM.

IDENTIFICACION: MUESTRA 2
FECHA DE ANALISIS: ABRIL 22 DE 2016

RESULTADOS

DETERMINACIÓN	COMO SE RECIBE	BASE SECA	METODO ASTM
HUMEDAD TOTAL, %	5,32		D 3302/D3302M - 12
PODER CALORIFICO, Kcal/Kg	4041	4288	D 5865 - 11a

Luz Dary Ortiz
Luz DARY ORTIZ
Inspector de Calidad
Firma Autorizada

APROBADO POR:
Edelmira Peña de Arco
Ing. Q. EDELMIRA PEÑA DE ARCO
Gerente General y Operativa
M.P. 1354

Carlos Javier Obando
CARLOS JAVIER OBANDO
Inspector de Calidad
Firma Autorizada

NOTA 1: Los resultados analíticos corresponden única y exclusivamente a la(s) muestra(s) (muestras) del LABORATORIO y no a otra(s) de la misma procedencia.
NOTA 2: Los resultados expresados en el certificado corresponden a las circunstancias y condiciones particulares del momento en que se analiza la muestra.
NOTA 3: INTERLABCO S.A.S. no se hace responsable por los perjuicios derivados del uso indebido del presente certificado por parte del cliente.
NOTA 4: La muestra de reserva se conserva en INTERLABCO S.A.S. durante 30 días calendario después de los cuales será desechada; igualmente se aceptara cualquier reclamación sobre los resultados emitidos única y exclusivamente durante este periodo.
NOTA 5: Si se detecta en este certificado alteración de resultados, tipo de letra, fecha u otra anomalía, comuníquese con INTERLABCO S.A.S para verificar autenticidad.
NOTA 6: El Laboratorio no es responsable de las posibles interpretaciones surgidas por la reproducción parcial del presente certificado.



Interlabco S.A.S.

LABORATORIO QUÍMICO INTERNACIONAL

Código: FT034/V04
Página: 1 de 1
Vigente desde: 26 - Feb - 12

Villa de San Diego de Ubaté, 22 de Abril de 2016

Ref. 45786
O.T. 15316

Señores
INDUSTRIAS TECSOL LTDA
Ciudad

CERTIFICADO DE CALIDAD

*¡Mejoramos continuamente!
Conocimiento, Información e Inteligencia
al servicio de nuestros clientes*

Nosotros, INTERLABCO S.A.S., certificamos que hemos PREPARADO Y ANALIZADO una (1) muestra(s) de BIOMASA TORREFACTADA, recibida(s) el día 21 de Abril de 2016 a las 12:30 horas, y los resultados obtenidos son los siguientes según normas ASTM.

IDENTIFICACION: MUESTRA 3
FECHA DE ANALISIS: ABRIL 22 DE 2016

RESULTADOS

DETERMINACIÓN	COMO SE RECIBE	BASE SECA	METODO ASTM
HUMEDAD TOTAL, %	5,02		D 3302/D3302M - 12
PODER CALORIFICO, Kcal/Kg	3805	4006	D 5865 - 11a

LUZ MARY ORTIZ
Inspector de Calidad
Firma Autorizada

APROBADO POR:
Ing. Q. EDELMIRA PEÑA DE ARCO
Gerente General y Operativa
M.P. 1354

CARLOS JAVIER OBANDO
Inspector de Calidad
Firma Autorizada

NOTA 1: Los resultados analíticos corresponden única y exclusivamente a la(s) muestra(s) traída(s) al LABORATORIO y no a otra(s) de la misma procedencia.
NOTA 2: Los resultados expresados en el certificado corresponden a las circunstancias y condiciones particulares del momento en que se analiza la muestra.
NOTA 3: INTERLABCO S.A.S. no se hace responsable por los perjuicios derivados del uso indebido del presente certificado por parte del cliente.
NOTA 4: La muestra de reserva se conserva en INTERLABCO S.A.S. durante 30 días calendario después de los cuales será desechada; igualmente se aceptara cualquier reclamación sobre los resultados emitidos única y exclusivamente durante este periodo.
NOTA 5: Si se detecta en este certificado alteración de resultados, tipo de letra, fecha u otra anomalía, comuníquese con INTERLABCO S.A.S para verificar autenticidad.
NOTA 6: El Laboratorio no es responsable de las posibles interpretaciones surgidas por la reproducción parcial del presente certificado.



Interlabco S.A.S.

LABORATORIO QUÍMICO INTERNACIONAL

Código: FT034/V04
Página: 1 de 1
Vigente desde: 26 - Feb - 12

Villa de San Diego de Ubaté, 22 de Abril de 2016

Ref. 45767
O.T. 15316

Señores
INDUSTRIAS TECSOL LTDA
Ciudad

CERTIFICADO DE CALIDAD

*¡Mejoramos continuamente!
Conocimiento, Información e Inteligencia
al servicio de nuestros clientes*

Nosotros, INTERLABCO S.A.S., certificamos que hemos PREPARADO Y ANALIZADO una (1) muestra(s) de BIOMASA TORREFACTADA, recibida(s) el día 21 de Abril de 2016 a las 12:30 horas, y los resultados obtenidos son los siguientes según normas ASTM.

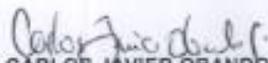
IDENTIFICACION: MUESTRA 4
FECHA DE ANALISIS: ABRIL 22 DE 2016

RESULTADOS

DETERMINACIÓN	COMO SE RECIBE	BASE SECA	METODO ASTM
HUMEDAD TOTAL, %	4,79		D 3302/D3302M - 12
PODER CALORIFICO, Kcal/Kg	3980	4180	D 5865 - 11a


LUZ DARY ORTIZ
Inspector de Calidad
Firma Autorizada


Ing. Q. EDEEMIRA PEÑA DE ARCO
Gerente General y Operativa
M.P. 1354


CARLOS JAVIER OBANDO
Inspector de Calidad
Firma Autorizada

NOTA 1: Los resultados analíticos corresponden (única y exclusivamente) a la(s) muestra(s) traída(s) al LABORATORIO y no a otra(s) de la misma procedencia.
NOTA 2: Los resultados expresados en el certificado corresponden a las circunstancias y condiciones particulares del momento en que se analiza la muestra.
NOTA 3: INTERLABCO S.A.S. no se hace responsable por los perjuicios derivados del uso indebido del presente certificado por parte del cliente.
NOTA 4: La muestra de reserva se conserva en INTERLABCO S.A.S. durante 30 días calendario después de los cuales será desechada; igualmente se aceptará cualquier reclamación sobre los resultados emitidos única y exclusivamente durante este periodo.
NOTA 5: Si se detecta en este certificado alteración de resultados, tipo de letra, fecha u otra anomalía, comuníquese con INTERLABCO S.A.S para verificar autenticidad.
NOTA 6: El Laboratorio no es responsable de las posibles interpretaciones surgidas por la reproducción parcial del presente certificado.



Interlabco S.A.S.

LABORATORIO QUÍMICO INTERNACIONAL

Código: FT034/V04
Página: 1 de 1
Vigente desde: 26 - Feb - 12

Villa de San Diego de Ubaté, 22 de Abril de 2016

Ref. 45788
O.T. 15316

Señores
INDUSTRIAS TECSOL LTDA
Ciudad

CERTIFICADO DE CALIDAD
*¡Mejoramos continuamente!
Conocimiento, Información e Inteligencia
al servicio de nuestros clientes*

Nosotros, INTERLABCO S.A.S., certificamos que hemos PREPARADO Y ANALIZADO una (1) muestra(s) de BIOMASA TORREFACTADA, recibida(s) el día 21 de Abril de 2016 a las 12:30 horas, y los resultados obtenidos son los siguientes según normas ASTM.

IDENTIFICACION: **MUESTRA 5**
FECHA DE ANALISIS: **ABRIL 22 DE 2016**

RESULTADOS

DETERMINACIÓN	COMO SE RECIBE	BASE SECA	METODO ASTM
HUMEDAD TOTAL, %	3,93		D 3302/D3302M - 12
PODER CALORIFICO, Kcal/Kg	4136	4305	D 5865 - 11a

LUZ DARY ORTIZ
LUZ DARY ORTIZ
Inspector de Calidad
Firma Autorizada



Carlos Javier Obando
CARLOS JAVIER OBANDO
Inspector de Calidad
Firma Autorizada

- NOTA 1: Los resultados analíticos corresponden única y exclusivamente a la(s) muestra(s) presentada(s) al LABORATORIO y no a otra(s) de la misma procedencia.
 NOTA 2: Los resultados expresados en el certificado corresponden a las circunstancias y condiciones particulares del momento en que se analiza la muestra.
 NOTA 3: INTERLABCO S.A.S. no se hace responsable por los perjuicios derivados del uso indebido del presente certificado por parte del cliente.
 NOTA 4: La muestra de reserva se conserva en INTERLABCO S.A.S. durante 30 días calendario después de los cuales será desechada; igualmente se aceptara cualquier reclamación sobre los resultados emitidos única y exclusivamente durante este periodo.
 NOTA 5: Si se detecta en este certificado alteración de resultados, tipo de letra, fecha u otra anomalía, comuníquese con INTERLABCO S.A.S para verificar autenticidad.
 NOTA 6: El Laboratorio no es responsable de las posibles interpretaciones surgidas por la reproducción parcial del presente certificado.



Interlabco S.A.S.

LABORATORIO QUÍMICO INTERNACIONAL

Código: FT034/V04
Página: 1 de 1
Vigente desde: 26 - Feb - 12

Villa de San Diego de Ubaté, 22 de Abril de 2016

Ref. 45799
O.T. 15316

Señores
INDUSTRIAS TECSOL LTDA
Ciudad

CERTIFICADO DE CALIDAD

*¡Mejoramos continuamente!
Conocimiento, Información e Inteligencia
al servicio de nuestros clientes*

Nosotros, INTERLABCO S.A.S., certificamos que hemos PREPARADO Y ANALIZADO una (1) muestra(s) de BIOMASA TORREFACTADA, recibida(s) el día 21 de Abril de 2016 a las 12:30 horas, y los resultados obtenidos son los siguientes según normas ASTM.

IDENTIFICACION: MUESTRA 6
FECHA DE ANALISIS: ABRIL 22 DE 2016

DETERMINACIÓN	RESULTADOS		
	COMO SE RECIBE	BASE SECA	METODO ASTM
HUMEDAD TOTAL, %	4,51		D 3302/D3302M - 12
PODER CALORIFICO, Kcal/Kg	4221	4420	D 5865 - 11a

LUZ GARY ORTIZ
Inspector de Calidad
Firma Autorizada



CARLOS JAVIER OBANDO
Inspector de Calidad
Firma Autorizada

- NOTA 1: Los resultados analíticos corresponden única y exclusivamente a la(s) muestra(s) indicada(s) al LABORATORIO y no a otra(s) de la misma procedencia.
NOTA 2: Los resultados expresados en el certificado corresponden a las circunstancias y condiciones particulares del momento en que se analiza la muestra.
NOTA 3: INTERLABCO S.A.S. no se hace responsable por los perjuicios derivados del uso indebido del presente certificado por parte del cliente.
NOTA 4: La muestra de reserva se conserva en INTERLABCO S.A.S. durante 30 días calendario después de los cuales será desechada; igualmente se aceptará cualquier reclamación sobre los resultados emitidos única y exclusivamente durante este periodo.
NOTA 5: Si se detecta en este certificado alteración de resultados, tipo de lote, fecha u otra anomalía, comuníquese con INTERLABCO S.A.S para verificar autenticidad.
NOTA 6: El Laboratorio no es responsable de las posibles interpretaciones surgidas por la reproducción parcial del presente certificado.



Interlabco S.A.S.

LABORATORIO QUÍMICO INTERNACIONAL

Código: FT034/V04
Página: 1 de 1
Vigente desde: 26 - Feb - 12

Villa de San Diego de Ubaté, 22 de Abril de 2016

Ref. 45790
O.T. 16316

Señores
INDUSTRIAS TECSOL LTDA
Ciudad

CERTIFICADO DE CALIDAD
*¡Mejoramos continuamente!
Conocimiento, Información e Inteligencia
al servicio de nuestros clientes*

Nosotros, INTERLABCO S.A.S., certificamos que hemos PREPARADO Y ANALIZADO una (1) muestra(s) de BIOMASA TORREFACTADA, recibida(s) el día 21 de Abril de 2016 a las 12:30 horas, y los resultados obtenidos son los siguientes según normas ASTM.

IDENTIFICACION: **MUESTRA 7**
FECHA DE ANALISIS: **ABRIL 22 DE 2016**

RESULTADOS

DETERMINACIÓN	COMO SE RECIBE	BASE SECA	METODO ASTM
HUMEDAD TOTAL, %	3,66		D 3302/D3302M - 12
PODER CALORIFICO, Kcal/Kg	4179	4338	D 5865 - 11a

YUZMARY ORTIZ
Inspector de Calidad
Firma Autorizada



CARLOS JAVIER OBANDO
Inspector de Calidad
Firma Autorizada

NOTA 1: Los resultados analíticos corresponden única y exclusivamente a la(s) muestra(s) enviada(s) al LABORATORIO y no a otra(s) de la misma procedencia.
NOTA 2: Los resultados expresados en el certificado corresponden a las circunstancias y condiciones particulares del momento en que se analiza la muestra.
NOTA 3: INTERLABCO S.A.S. no se hace responsable por los perjuicios derivados del uso indebido del presente certificado por parte del cliente.
NOTA 4: La muestra de reserva se conserva en INTERLABCO S.A.S. durante 30 días calendario después de los cuales será desechada; igualmente se aceptará cualquier reclamación sobre los resultados emitidos única y exclusivamente durante este periodo.
NOTA 5: Si se detecta en este certificado alteración de resultados, tipo de letra, fecha u otra anomalía, comuníquese con INTERLABCO S.A.S para verificar autenticidad.
NOTA 6: El Laboratorio no es responsable de las posibles interpretaciones surgidas por la reproducción parcial del presente certificado.



Interlabco S.A.S.

LABORATORIO QUÍMICO INTERNACIONAL

Código: FT034/V04
Página: 1 de 1
Vigente desde: 26 - Feb - 12

Villa de San Diego de Ubaté, 22 de Abril de 2016

Ref. 45791
O.T. 15316

Señores
INDUSTRIAS TECSOL LTDA
Ciudad

CERTIFICADO DE CALIDAD
*¡Mejoramos continuamente!
Conocimiento, Información e Inteligencia
al servicio de nuestros clientes*

Nosotros, INTERLABCO S.A.S., certificamos que hemos PREPARADO Y ANALIZADO una (1) muestra(s) de BIOMASA TORREFACTADA, recibida(s) el día 21 de Abril de 2016 a las 12:30 horas, y los resultados obtenidos son los siguientes según normas ASTM.

IDENTIFICACION: MUESTRA 8
FECHA DE ANALISIS: ABRIL 22 DE 2016

RESULTADOS

DETERMINACIÓN	COMO SE RECIBE	BASE SECA	METODO ASTM
HUMEDAD TOTAL, %	3,91		D 3302/D3302M - 12
PODER CALORIFICO, Kcal/Kg	4156	4325	D 5865 - 11a

Luz Dary Ortiz
LUZ DARY ORTIZ
Inspector de Calidad
Firma Autorizada



Carlos Javier Obando
CARLOS JAVIER OBANDO
Inspector de Calidad
Firma Autorizada

- NOTA 1: Los resultados analíticos corresponden única y exclusivamente a la(s) muestra(s) presentada(s) al LABORATORIO y no a otra(s) de la misma procedencia.
 NOTA 2: Los resultados expresados en el certificado corresponden a las circunstancias y condiciones particulares del momento en que se analiza la muestra.
 NOTA 3: INTERLABCO S.A.S. no se hace responsable por los perjuicios derivados del uso indebido del presente certificado por parte del cliente.
 NOTA 4: La muestra de reserva se conserva en INTERLABCO S.A.S. durante 30 días calendario después de los cuales será desechada; igualmente se aceptará cualquier reclamación sobre los resultados emitidos única y exclusivamente durante este periodo.
 NOTA 5: Si se detecta en este certificado alteración de resultados, tipo de letra, fecha u otra anomalía, comuníquese con INTERLABCO S.A.S para verificar autenticidad.
 NOTA 6: El Laboratorio no es responsable de las posibles interpretaciones surgidas por la reproducción parcial del presente certificado.



Interlabco S.A.S.

LABORATORIO QUÍMICO INTERNACIONAL

Código: FT034/V04
Página: 1 de 1
Vigente desde: 26 - Feb - 12

Villa de San Diego de Ubaté, 22 de Abril de 2016

Ref. 45792
O.T. 15316

Señores
INDUSTRIAS TEC SOL LTDA
Ciudad

CERTIFICADO DE CALIDAD
*¡Mejoramos continuamente!
Conocimiento, Información e Inteligencia
al servicio de nuestros clientes*

Nosotros, INTERLABCO S.A.S., certificamos que hemos PREPARADO Y ANALIZADO una (1) muestra(s) de BIOMASA TORREFACTADA, recibida(s) el día 21 de Abril de 2016 a las 12:30 horas, y los resultados obtenidos son los siguientes según normas ASTM.

IDENTIFICACION: MUESTRA 9
FECHA DE ANALISIS: ABRIL 22 DE 2016

RESULTADOS

DETERMINACIÓN	COMO SE RECIBE	BASE SECA	METODO ASTM
HUMEDAD TOTAL, %	3,76		D 3302/D3302M - 12
PODER CALORIFICO, Kcal/Kg	4126	4287	D 5865 - 11a

[Firma]
LUZ DARY ORTIZ
Inspector de Calidad
Firma Autorizada



[Firma]
CARLOS JAVIER OBANDO
Inspector de Calidad
Firma Autorizada

NOTA 1: Los resultados analíticos corresponden única y exclusivamente a la(s) muestra(s) presentada(s) al LABORATORIO y no a otra(s) de la misma procedencia.
NOTA 2: Los resultados expresados en el certificado corresponden a las circunstancias y condiciones particulares del momento en que se analiza la muestra.
NOTA 3: INTERLABCO S.A.S. no se hace responsable por los perjuicios derivados del uso indebido del presente certificado por parte del cliente.
NOTA 4: La muestra de reserva se conserva en INTERLABCO S.A.S. durante 30 días calendario después de los cuales será desechada; igualmente se aceptará cualquier reclamación sobre los resultados emitidos única y exclusivamente durante este periodo.
NOTA 5: Si se detecta en este certificado alteración de resultados, tipo de letra, fecha u otra anomalía, comuníquese con INTERLABCO S.A.S para verificar autenticidad.
NOTA 6: El Laboratorio no es responsable de las posibles interpretaciones surgidas por la reproducción parcial del presente certificado.

ANEXO C
**RESULTADO DE ANÁLISIS DE PODER CALORÍFICO PARA MUESTRA
 TORREFACTADA A 260°C Y 80 MIN**



Interlabco S.A.S.
 LABORATORIO QUÍMICO INTERNACIONAL

Código: FT034/V04
Página: 1 de 1
Vigente desde: 26 - Feb - 12

Villa de San Diego de Ubaté, 29 de Abril de 2016

Ref. 45821
 O.T. 15338

Señores
INDUSTRIAS TECSOL LTDA
 Ciudad

CERTIFICADO DE CALIDAD
*¡Mejoramos continuamente!
 Conocimiento, Información e Inteligencia
 al servicio de nuestros clientes*

Nosotros, INTERLABCO S.A.S., certificamos que hemos PREPARADO Y ANALIZADO una (1) muestra(s) de BIOMASA, recibida(s) el día 28 de Abril de 2016 a las 16:30 horas, y los resultados obtenidos son los siguientes según normas ASTM.

IDENTIFICACION: MUESTRA 1
FECHA DE ANALISIS: ABRIL 29 DE 2016

RESULTADOS

DETERMINACIÓN	COMO SE RECIBE	BASE SECA	METODO ASTM
HUMEDAD TOTAL, %	4,58		D 3302/D3302M - 12
PODER CALORIFICO, Kcal/Kg	4143	4342	D 5865 - 11a

LUZ DARY ORTIZ
LUZ DARY ORTIZ
 Inspector de Calidad
 Firma Autorizada

Ing. EDILMIRRENA DE ARCO
 Gerente General y Operativa
 M.P. 1354

CARLOS JAVIER OBANDO
CARLOS JAVIER OBANDO
 Inspector de Calidad
 Firma Autorizada

NOTA 1: Los resultados analíticos corresponden única y exclusivamente a la(s) muestra(s) enviada(s) al LABORATORIO y no a otra(s) de la misma procedencia.
 NOTA 2: Los resultados expresados en el certificado corresponden a las circunstancias y condiciones particulares del momento en que se analiza la muestra.
 NOTA 3: INTERLABCO S.A.S. no se hace responsable por los perjuicios derivados del uso indebido del presente certificado por parte del cliente.
 NOTA 4: La muestra de reserva se conserva en INTERLABCO S.A.S. durante 30 días calendario después de los cuales será desechada; igualmente se aceptara cualquier reclamación sobre los resultados emitidos única y exclusivamente durante este periodo.
 NOTA 5: Si se detecta en este certificado alteración de resultados, tipo de letra, fecha u otra anomalía, comuníquese con INTERLABCO S.A.S para verificar autenticidad.
 NOTA 6: El Laboratorio no es responsable de las posibles interpretaciones surgidas por la reproducción parcial del presente certificado.

ANEXO D FUNCIONES DE TRANSFORMACIÓN PARA LA PRIORIZACIÓN DE TIEMPO DE RESIDENCIA Y TEMPERATURA DE TORREFACCIÓN

Del Gráfico 20 al Gráfico 23 se puede observar las funciones de transformación utilizadas para la determinación de las condiciones de operación del proceso de torrefacción.

Gráfico 20. Función de transformación para porcentaje de humedad

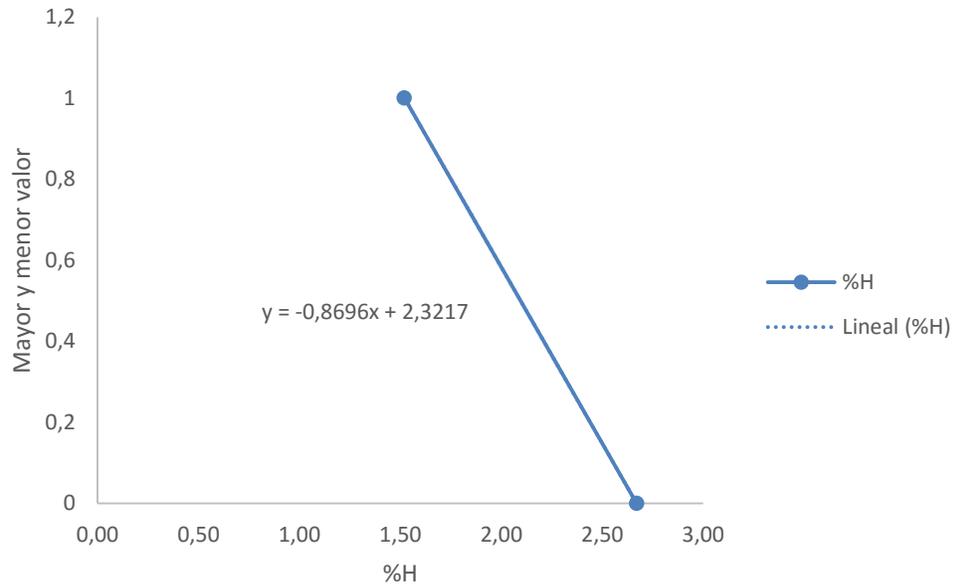


Gráfico 21 .Función de transformación para poder calorífico

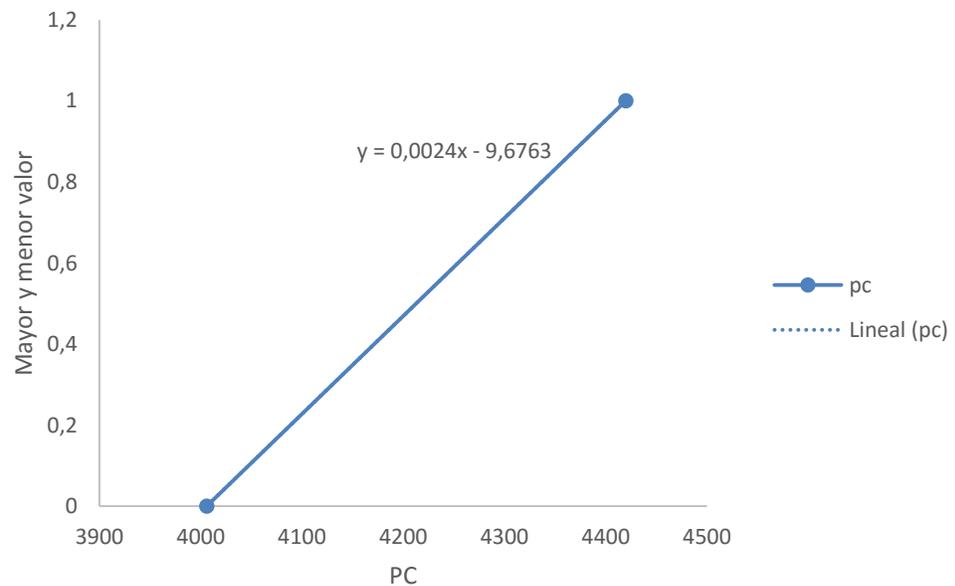


Gráfico 22. Función de transformación para porcentaje de cenizas

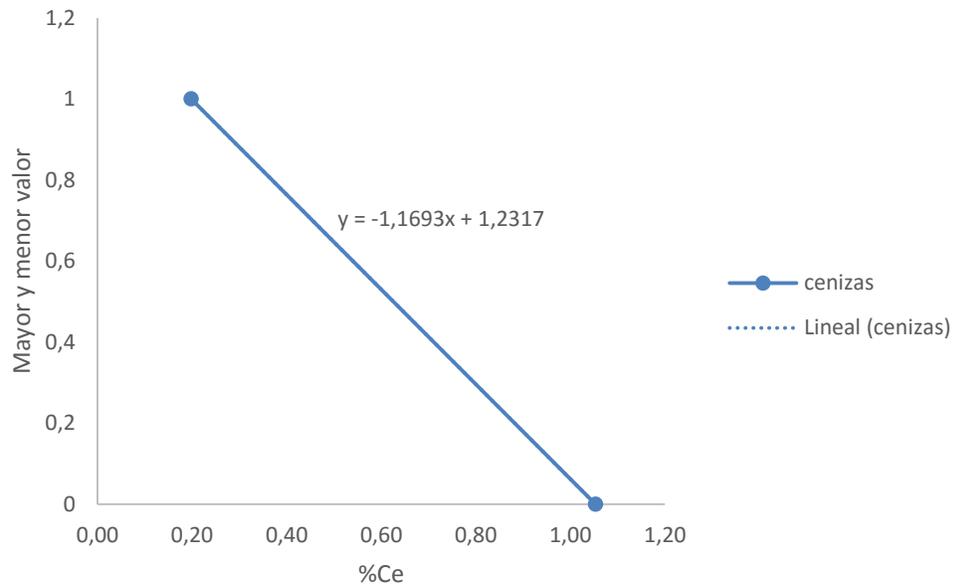
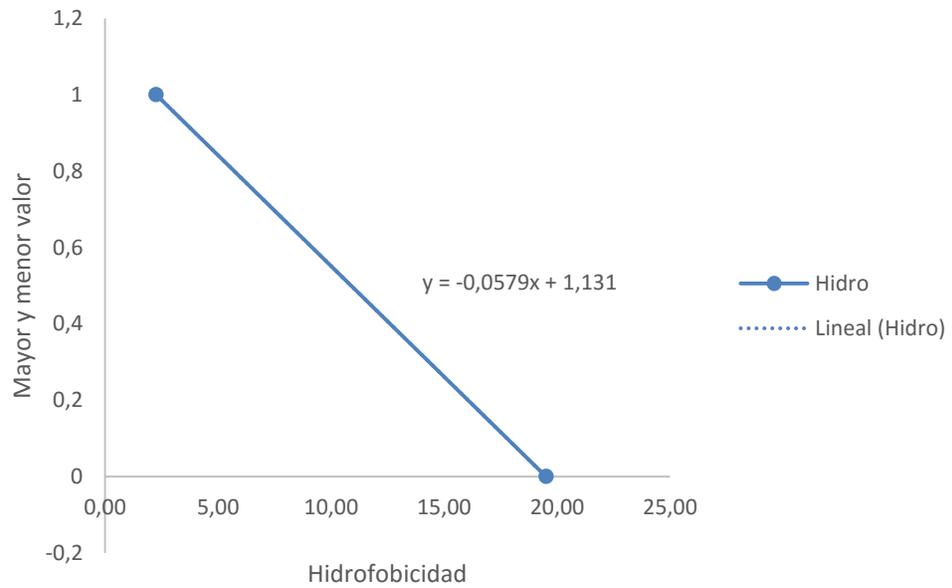


Gráfico 23. Función de transformación para Hidrofobicidad



ANEXO E
COTIZACIÓN DE TRANSPORTE DE BIOMASA RESIDUAL

TRANSPORTES SANABRIA

NIT: 74751820-4

Contactos: 3212007725/3134103794

Servicios de transporte de carga a todas partes del país

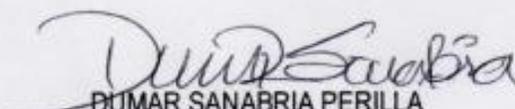
COTIZACION A QUIEN INTERESE

Vr. Transporte M3/Km de carga a cualquier parte del país. . . . \$ 1.200.

Vr. Transporte M3/Km de carga en cascos urbanos \$ 950.

Contamos con volquetas sencillas y dobles acuerdo a cada necesidad placa UVLS10,
documentación al día, igualmente la idoneidad de sus conductores.

Se expide la presente a solicitud del Interesado a los 07 días del mes de mayo del 2016


DUMAR SANABRIA PERILLA
Propietario

ANEXO F
FACTURA DE GAS UTILIZADA PARA CONOCER EL PRECIO DEL m³

Numero de cuenta / Referencia de pago
Para pago por medios electrónicos o cualquier inquietud cita este número

21551027

Factura No. H160046396
Fecha factura 14Abr2016

INDUSTRIAS TEC SOL LIMITADA TEC SOL
KR 4 9D 2 1
Municipio: SOACHA Sector: PARAISO
Dirección Correspondencia: KR 4 9D 2 1 Lote: 9613 Ruta: 13002020205845

Gas Natural, S.A. ESP
www.gasnaturalfenosa.com.co

gasNatural fenosa

Línea de COMERCIAL: cliente
Lunes a Viernes de 7 a.m. a 6 p.m.
y sábados de 7 a.m. a 1 p.m.
307 8121
Municipios celular
015000 942 794 opción 4

Línea de urgencias, para reportar fugas y/o escapes las 24 horas
Fijo o móvil **164**

Total a pagar **974,550**

Pagar antes de **28Abr2016**

Recuerde que en el respaldo de la factura encuentra los puntos de pago autorizados.
Adicional: el costo de la reconexión por suspensión es de \$ 41.215

Sus consumos de gas en los últimos seis meses fueron

Su consumo en M3 de gas equivale a: 7,517.63 KWH y EL PRECIO UNITARIO DE KWH ES \$ 118.15 P.C.: 47.731 M.J/M3

Conceptos facturados

DESCRIPCION	VALOR
CONSUMO GAS = 567 M3 X 1566,5700 PESOS/M	888,245
FIJO	2,878
AJUSTE DECENA	3
MAS CONTRIB. FIJO CCIAL. 8.9%	256
MAS CONTRIB. CONSUMO CCIAL. 8.9%	79,054
INT. RECARGO/PAGO TPD (0,0741%)	4,114
SUBTOTAL	\$ 974,550
TOTAL	\$ 974,550

81 324 850
82 324 850
06 32

Para su información
No de facturas vencidas a este corte: 0

Concepto	Capital anterior	Capital Actual	Tasa aplicada	Tasa maxima
Saldo créditos vigentes				

Datos de medición			
No Med	IT 82-10-5 5908941	Periodo facturado	Mar-2016 Abr-2016
lectura an.	29722	Tipo de lectura	REAL
lectura actual	30289	Tipo de lectura	REAL
Consumo medido (m3)	567	Estrato/Categoría	3
Fecha de lectura	10-Mar-2016	Uso	COMERCIAL
Fecha de lectura	11-Abr-2016	Tarifa	C1

Revisión de la instalación interna

La revisión de la instalación interna es tu responsabilidad. Por ley es obligatoria. Realízala dentro de los plazos establecidos y evita la suspensión del servicio.

Infórmate en www.gasnaturalfenosa.com.co

Res. CREG 137/13 COMPONENTE Cúvm1566.57(\$/m3) Gm662.55 Tm448.69 p3.24% Um 418.15 Fpcm1.13 Cvm0.00 Cam0.00 Componente Cufm 2878.00(\$/Factura) Dfm2878.00 Cm0.00

Res. CREG127/13Kp00,999K01,001Fpv01,00Pa10,94Pm03,69Altura2555Tm15,2700

Fecha de suscripción y vigencia del consumo de esta factura: 28Abr2016