	GESTIÓN DE SERVICIOS ACADÉMICOS Y BIBLIOTECARIOS		CÓDIGO	FO-GS-15	
			VERSIÓN	02	
	ESQUEMA HOJA DE RESUMEN			FECHA	03/04/2017
				PÁGINA	1 de 1
ELABORÓ		REVISÓ		APROBÓ	
Jefe División de Biblioteca		Equipo Operativo de Calidad		Líder de Calidad	

RESUMEN DE TRABAJO DE GRADO

AUTORES:

NOMBRES: SANDY JOHANNA

APELLIDOS: ORTIZ URIBE

NOMBRES: HEYDI YURLEY

APELLIDOS: RAMIREZ CRUZ

FACULTAD: FACULTAD DE INGENIERÍA

PLAN DE ESTUDIOS: PLAN DE ESTUDIOS DE INGENIERIA DE MINAS

DIRECTOR:

NOMBRES: PEDRO PABLO

APELLIDOS: TORRES MEDINA

TÍTULO DEL TRABAJO: MEZCLA DE BIOMASA CON CARBÓN TÉRMICO PARA SU USO INDUSTRIAL COMO GENERADOR DE ENERGÍA DEL SISTEMA DE LECHO FLUIDIZADO

RESUMEN

Las emisiones atmosféricas que generan los procesos que consumen carbón se constituyen como uno de los factores que influyen en el cambio climático debido a la generación de gases de efecto invernadero haciendo más difícil la sostenibilidad de las minas que los producen y de las plantas, día a día aumentan las exigencias legales con el único objetivo de obtener la protección al medio ambiente, para ello se planteó realizar la mezclas de biomasa y carbón térmico para el funcionamiento del sistema del lecho fluidizado, garantizando el calor necesario para el proceso de atomización de la barbotina en la planta de procesos cerámicos.

PALABRAS CLAVES: BIOMASA, CARBÓN, COMBUSTIÓN, LECHO FLUIDIZADO Y EMISIONES ATMOSFÉRICA.

CARACTERÍSTICAS:

PAGINAS: 135 PLANOS: ___ ILUSTRACIONES: 47 CD ROOM: ___

MEZCLA DE BIOMASA CON CARBÓN TÉRMICO PARA SU USO INDUSTRIAL COMO
GENERADOR DE ENERGÍA DEL SISTEMA DE LECHO FLUIDIZADO

SANDY JOHANNA ORTIZ URIBE
HEYDI YURLEY RAMIREZ CRUZ

UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍA
PLAN DE ESTUDIOS DE INGENIERIA DE MINAS
SAN JOSE DE CUCUTA

2020

MEZCLA DE BIOMASA CON CARBÓN TÉRMICO PARA SU USO INDUSTRIAL
COMO GENERADOR DE ENERGÍA DEL SISTEMA DE LECHO FLUIDIZADO

SANDY JOHANNA ORTIZ URIBE

HEYDI YURLEY RAMIREZ CRUZ

Proyecto final en modalidad pasantía, como requisito para optar el título de Ingeniero de

Minas

Director:

TORRES MEDINA PEDRO PABLO

Ingeniero Metalúrgico

UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER

FACULTAD DE INGENIERÍA

PLAN DE ESTUDIOS DE INGENIERIA DE MINAS

SAN JOSE DE CUCUTA

2020

**CARTA DE AUTORIZACIÓN DE LOS AUTORES PARA LA CONSULTA, LA
REPRODUCCIÓN PARCIAL O TOTAL Y LA PUBLICACIÓN ELECTRÓNICA DEL
TEXTO COMPLETO**

Cúcuta, 13 de julio de 2020

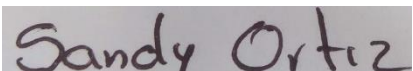
Señores
BIBLIOTECA EDUARDO COTE LAMUS
Cúcuta

Cordial saludo:

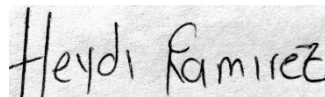
SANDY JOHANNA ORTIZ URIBE, identificado con la C.C. N° 1090494855 y HEYDI YURLEY RAMIREZ CRUZ , identificado con la C.C. N° 1090466426 autores de la tesis y/o trabajo de grado titulado MEZCLA DE BIOMASA CON CARBÓN TÉRMICO PARA SU USO INDUSTRIAL COMO GENERADOR DE ENERGÍA DEL SISTEMA DE LECHO FLUIDIZADO. Presentado y aprobado en el año 2020 como requisito para optar al título de ingeniero de minas; autorizamos a la biblioteca de la Universidad Francisco de Paula Santander, Eduardo Cote Lamus, para que con fines académicos, muestre a la comunidad en general a la producción intelectual de esta institución educativa, a través de la visibilidad de su contenido de la siguiente manera:

- Los usuarios pueden consultar el contenido de este trabajo de grado en la página web de la Biblioteca Eduardo Cote Lamus y en las redes de información del país y el exterior, con las cuales tenga convenio la Universidad Francisco de Paula Santander.
- Permita la consulta, la reproducción, a los usuarios interesados en el contenido de este trabajo, para todos los usos que tengan finalidad académica, ya sea en formato CD-ROM o digital desde Internet, Intranet etc.; y en general para cualquier formato conocido o por conocer.

Lo anterior, de conformidad con lo establecido en el artículo 30 de la ley 1982 y el artículo 11 de la decisión andina 351 de 1993, que establece que “los derechos morales del trabajo son propiedad de los autores”, los cuales son irrenunciables, imprescriptibles, inembargables e inalienables.



SANDY JOHANNA ORTIZ URIBE
C.C. 1090494855



HEYDI YURLEY RAMIREZ CRUZ
C.C. 1090466426

ACTA DE SUSTENTACION DE UN TRABAJO DE GRADO

FECHA: Cúcuta, 01 de junio de 2020

HORA: 4:00 p.m.

LUGAR: TICS MEET

PLAN DE ESTUDIOS: INGENIERIA DE MINAS

TITULO DE LA TESIS: MODALIDAD PASANTIA: "MEZCLA DE BIOMASA CON CARBÓN TÉRMICO PARA SU USO INDUSTRIAL COMO GENERADOR DE ENERGÍA DEL SISTEMA DE LECHO FLUIDIZADO."

JURADOS: Ing. YESID CASTRO DUQUE
Ing. MANUEL MARIA ORTEGA
Mg. YUD ALBEIRO ISAZA HERRERA

ENTIDAD: U. F. P. S.
ENTIDAD: U. F. P. S.
ENTIDAD: U. F. P. S.

DIRECTOR: Ing. PEDRO PABLO TORRES MEDINA

NOMBRE DE LOS ESTUDIANTE	CÓDIGO	CALIFICACIÓN		(A) (M) (L)
		NUMERO	LETRA	
SANDY JOHANNA ORTIZ URIBE	1180828	4.5	CUATRO, CINCO	MERITORIA
HEYDI YURLEY RAMIREZ CRUZ	1180842	4.5	CUATRO, CINCO	MERITORIA

OBSERVACIONES:

FIRMA DE LOS JURADOS:



V. B.


COORDINADOR COMITÉ CURRICULAR

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	12
1. Problema	13
1.1. Título	13
1.2. Planteamiento del problema	13
1.3. Formulación del problema	14
1.4. Objetivos	14
1.4.1 Objetivo general	14
1.4.2 Objetivos específicos	14
1.5 Justificación	14
1.6 Alcances y limitaciones	15
1.6.1 Alcances	15
1.6.2. Limitaciones	15
1.7 Delimitaciones	16
1.7.1 Delimitación espacial	16
1.7.2 Delimitación temporal	16
1.7.3 Delimitación conceptual	16
1.8. Marco referencial	17
1.8.1 Antecedentes	17
1.8.2 Marco teórico	20
1.8.2.1 Leyes de termodinámica	20
1.8.2.2 Composición de la biomasa	21
1.8.2.3. Propiedades del carbón	23
1.8.3. Marco legal	25
2. Diseño metodológico	28
2.1. Tipo de investigación	28
2.2. Población y muestra	28
2.2.1. Población	28
2.2.1. Muestra	29
2.3 Instrumento para la recolección de información	29
2.4. Técnicas de análisis y procedimiento de datos	29
2.5 Presentación de resultados	30
3. Desarrollo	31
Fundamentos Teóricos	31
3.1. Combustor de lecho Fluidizado.	31
3.1.1 Proceso de combustión en lecho fluido.	31
3.1.2 Eficiencia de la combustión.	33

3.2. Carbón Térmico.	33
3.2.1. Tipo de muestreo	34
3.2.2. Muestreo para propósitos especiales.	37
3.2.3. Parámetros generales de clasificación.	38
3.3 Biomosas	39
3.3.1 Tipos de biomasa según su origen	42
3.3.1.1 Natural.	42
3.3.1.3 Cultivos energéticos.	43
3.3.2 Clasificación según su estado	43
3.3.2.1 Biomasa sólida:	43
3.3.2.2 Biomasa líquida:	44
3.3.2.3 Biomasa gaseosa	44
3.3.3 Aplicaciones de las biomosas.	44
3.4 Caracterización del Carbón	45
3.4.1 Propiedades Físicas del Carbón	46
3.4.1.1 Estructura.	46
3.4.1.2 Porosidad.	47
3.4.1.3 Dureza.	48
3.4.2 Propiedades Químicas	48
3.4.2.1 Humedad:	48
3.4.2.2 Ceniza.	48
3.4.2.3 Índice de hinchamiento.	49
3.4.2.4 Materia volátil.	49
3.4.3 Propiedades Térmicas	50
3.4.3.1 Conductibilidad Térmica.	50
3.4.3.2 Calor específico.	50
3.4.3.3 Dilatación.	50
3.5 Caracterización de las Biomosas	50
3.5.1 Propiedades Físicas	51
3.5.1.1 Contenido de humedad.	51
3.5.1.2 Porcentaje en cenizas.	51
3.5.1.3 Poder calorífico.	51
3.5.1.4 Densidad aparente.	52
3.5.2 Propiedades Químicos	52
3.5.3 Propiedades Térmicas	52
3.5.4 Selección de Materiales	53
3.5.5 Toma de Muestras	55
3.5.5.1 Toma de muestra biomasa.	55
3.5.5.2 Toma de muestra de carbón.	58
3.6. Determinación de parámetros:	62
3.6.1. Porcentaje de humedad (%H)	62
3.6.2 Distribución granulométrica.	64
3.6.3. Preparación de las muestras representativas	65
4. Parte experimental	68
4.1 Preparación de la muestra	68
4.1.1. Equipos utilizados para la preparación de la muestra de análisis.	68
4.1.1.1. Balanza digital	68
4.1.1.2. El cuarteador	69
4.1.1.3. Pulverizador o Molino de martillos	70

4.1.1.4. Tamizadora:	72
4.1.1.5. Homogeneizador.	74
4.1.1.5. Bandejas.	74
4.1.2. Procedimiento de reducción y división manual	74
4.2. Método de análisis.	75
4.2.1. Análisis próximos	76
4.2.1.1. Determinación de la humedad total de muestra de carbón y coque según norma ASTM de 3302/D 3302M-12	76
4.2.1.2. Humedad superficial o libre	76
4.2.1.3. Humedad residual	76
4.2.1.4. Determinación de la ceniza según Norma ASTM 3174-12	77
4.2.1.5. Determinación de materia volátil según norma ASTM D-3175-11	77
4.2.1.6. Determinación de azufre según norma ASTM D 4239-14 E02	77
4.2.1.7. Determinación de carbono fijo según norma ASTM D 3172-13	78
4.2.1.8. Determinación de índice de hinchamiento según norma ASTM D 720/D720M-15E01	78
4.2.1.9. Fusibilidad de cenizas según norma ASTM 1857/1857M-04(2010) (A)	79
4.2.2. Análisis últimos	79
4.2.2.1. Determinación de carbono e hidrogeno en muestra de carbón y coque según norma ASTM D 5373-16 Método A (A)	79
4.2.2.2. Determinación de nitrógeno en muestra de carbón y coque según norma ASTM D 5373-16 Método A (A)	80
5. Resultados y análisis del carbón	80
5.1. Reporte de resultados de análisis próximos completos del carbón de consumo en base como se recibe.	80
5.2. Reporte de resultados del análisis del índice libre de hinchamiento (FSI) del carbón de consumo secado al aire	82
5.3. Reporte de resultados de análisis de fusibilidad de cenizas en atmosfera oxidante del carbón de consumo dada en °C.	83
5.4. Reporte de resultados de análisis de fusibilidad de cenizas en atmosfera reductora del carbón de consumo en °C	84
5.5. Reporte de resultados de análisis últimos del carbón de consumo en base como se recibe	85
5.6. Reporte de resultados de análisis próximos completos de las biomazas en base como se recibe	85
5.7 Análisis petrográfico	87
5.7.1 Reporte de resultado del análisis petrográfico de la muestra representativa de consumo.	89
5.8 Clasificación del carbón.	89
5.8.1 Reporte de resultado de análisis próximos de la muestra representativa del consumo en diferentes bases.	92
5.9 La calorimetría diferencial de barrido DSC de biomazas y carbón	93
5.9.1. Descripción Del Procedimiento de la Calorimetría Diferencial de Barrido, DSC	94
5.10 Análisis por Termo Gravimetría (TGA) de biomazas y carbón	94
5.11 Análisis químicos de las biomazas y carbón	102
5.11.1. Reporte de resultados de análisis químicos de las biomazas y carbón de consumo	102
6 Resultados y análisis de las biomazas	107
6.1 Análisis elemental de las biomazas	107
6.1.1. Cenizas AOAC 942.05	108
6.1.2. Fibra Detergente Neutro (FDN)	108

6.1.3. Fibra Detergente Ácido (FDA)	111
6.1.4. Celulosa	113
6.1.5. Lignina	113
6.1.6. Hemicelulosa	113
6.1.7. Humedad (Hu)	114
7 Conformación de las mezclas	115
7.1 Resultados obtenidos de las mezclas biomasa – carbón	115
7.1.1 Mejores alternativas de mezclas de biomasa con carbón en los análisis Termo Gravimétrico, TGA y Calorimetría diferencial de barrido, DSC	122
Conclusiones	124
Recomendaciones	126
Anexos	127
Referencias Bibliográficas	128

Lista de Figuras

FIGURA 1 PROCESOS FÍSICOS QUÍMICOS QUE TIENEN LUGAR EN LA COMBUSTIÓN EN LECHO FLUIDO.	32
FIGURA 2 BIOMASA.	39
FIGURA 3 TIPOS DE BIOMASA	41
FIGURA 4 PERFILES PATRÓN Y LOS CORRIENTES NÚMEROS DE ÍNDICE DE HINCHAMIENTO	49
FIGURA 5 CISCO DE CAFÉ	56
FIGURA 6 CASCARILLA DE ARROZ	56
FIGURA 7 ASERRÍN	57
FIGURA 8 MUESTRAS REPRESENTATIVAS DE LAS BIOMASAS	57
FIGURA 9 SISTEMA COMBUSTOR LECHO FLUIDIZADO	58
FIGURA 10 TOLVA DE ALIMENTACIÓN DEL SISTEMA COMBUSTOR LECHO FLUIDIZADO	59
FIGURA 11 MUESTRAS REPRESENTATIVAS PARA REALIZAR LOS ANÁLISIS PERTINENTES	60
FIGURA 12 TOMA DE MUESTRA EN LA DESCARGA DE LA BANDA TRANSPORTADORA	61
FIGURA 13 TOMA DE MUESTRA EMPACADA Y ROTULADA	61
FIGURA 14 BALANZA (METTLER TOLEDO HB-43), CONFIGURADA AL COMPUTADOR CON EL SOFTWARE (LABX DIRECT MOISTURE 2.2)	63
FIGURA 15 HUMEDADES DE MUESTRAS REPRESENTATIVAS	63
FIGURA 16 EQUIPO DE TAMIZADO	64
FIGURA 17 HOMOGENIZACIÓN DE LA MUESTRA	65
FIGURA 18 CUARTEO DE LA MUESTRA	66
FIGURA 19 EMPACADA Y ROTULADA LA MUESTRA TESTIGO Y REPRESENTATIVA	66
FIGURA 20 MUESTRA DE ANÁLISIS QUÍMICOS	67
FIGURA 21 BALANZA DIGITAL	69
FIGURA 22 CUARTEADOR	70
FIGURA 23 PULVERIZADOR O MOLINO DE MARTILLOS UFPS	71
FIGURA 24 MOLINO DE MARTILLOS DE LA PLANTA DE PROCESOS CERÁMICOS	71
FIGURA 25 TAMIZADOR LABORATORIO DE CARBONES UFPS	73
FIGURA 26 TAMIZADORA DE LA PLANTA DE PROCESOS CERÁMICOS	73
FIGURA 27 HOMOGENEIZADOR	74
FIGURA 28 ANÁLISIS PETROGRÁFICO MUESTRA REPRESENTATIVA CARBÓN TÉRMICO CONSUMO	87
FIGURA 29 CLASIFICACIÓN DE LOS CARBONES, SEGÚN LA NORMA ISO 11760 - 2005	92
FIGURA 30 GRÁFICA DSC -TGA MUESTRA 1 CARBÓN	96
FIGURA 31 DSC-TGA MUESTRA CARBÓN 2	96
FIGURA 32 GRÁFICA DSC -TGA MUESTRA CARBÓN 3	97
FIGURA 33 GRÁFICA DSC M1, M2, M3 DE CARBÓN	97
FIGURA 34 GRÁFICA DSC-TGA CASCARILLA DE ARROZ	98
FIGURA 35 GRÁFICA DSC-TGA CISCO DE CAFÉ	98
FIGURA 36 GRÁFICA DSC-TGA ASERRÍN	99
FIGURA 37 GRÁFICA DSC DE CASCARILLA DE ARROZ, CISCO DE CAFÉ, ASERRÍN	99
FIGURA 38 GRÁFICA TGA M1, M2, M3 DE CARBÓN	100
FIGURA 39 GRÁFICA TGA DE LAS BIOMASAS	101
FIGURA 40 GRÁFICAS DE TGA DE LAS MEZCLAS 25% BIOMASA-75% CARBÓN	116
FIGURA 41 GRÁFICAS DE TGA DE LAS MEZCLAS 50% BIOMASA-50% CARBÓN	117
FIGURA 42 GRÁFICAS DE TGA DE LAS MEZCLAS 75% BIOMASA-25% CARBÓN	118
FIGURA 43 GRÁFICAS DE DSC DE LAS MEZCLAS 25% BIOMASA-75% CARBÓN	119
FIGURA 44 GRÁFICAS DE DSC DE LAS MEZCLAS 50% BIOMASA-50% CARBÓN	120
FIGURA 45 GRÁFICAS DE DSC DE LAS MEZCLAS 75% BIOMASA-25% CARBÓN	121
FIGURA 46 GRÁFICA TGA MEJOR ALTERNATIVA DE MEZCLA DE BIOMASA CARBÓN	122

Lista de Tablas

TABLA 1 DISTRIBUCIÓN GRANULOMÉTRICA	64
TABLA 2 ANÁLISIS PRÓXIMO COMPLETO ASTM COAL H D3302, C D	81
TABLA 3 ANÁLISIS DE FSI- FREE SWELLING INDEX	82
TABLA 4 ANÁLISIS DE FUSIBILIDAD EN CENIZAS EN ATMOSFERA OXIDANTE	83
TABLA 5 ANÁLISIS DE FUSIBILIDAD EN CENIZAS EN ATMOSFERA REDUCTORA	84
TABLA 6 ANÁLISIS ÚLTIMOS DE CARBÓN	85
TABLA 7 ANÁLISIS PRÓXIMOS COMPLETOS DE LAS BIOMASAS	86
TABLA 8 FORMACIÓN DE LOS MACÉRALES DE LOS CARBONES DUROS EN FUNCIÓN DEL MEDIO Y LAS SUSTANCIAS VEGETALES DE LA PROCEDENCIA	88
TABLA 9 ANÁLISIS PETROGRÁFICO MUESTRA REPRESENTATIVA DE CONSUMO	89
TABLA 10 CLASIFICACIÓN DE CARBONES POR RANGO, (ASTM D-388)	91
TABLA 11 ANÁLISIS PRÓXIMOS DE LA MUESTRA REPRESENTATIVA DEL CONSUMO EN DIFERENTES BASES.	93
TABLA 12 RESULTADOS DE ANÁLISIS QUÍMICOS	103
TABLA 13 ÍNDICES DE FOULING Y SLAGGING	106
TABLA 14 ANÁLISIS ELEMENTAL DE LAS BIOMASAS	107
TABLA 15 MEZCLAS DE CARBÓN Y BIOMASA	116

Introducción

El carbón es una fuente importante para generar energía a partir de su combustión; sin embargo, este proceso produce emisiones de CO₂, SOX Y NOX, factores que influyen en el cambio climático debido a la generación de gases de efecto invernadero haciendo más difícil la sostenibilidad de las minas que los producen y de las plantas que lo consumen, por tanto se hace necesario el desarrollo de tecnologías más eficientes y limpias que permitan el uso de este recurso de manera más amigable con el medio ambiente (Romero, 2010).

Día a día aumentan las exigencias legales con el único objetivo de obtener la protección al medio ambiente, para ello se plantea realizar la combustión de mezclas de biomasa y carbón térmico para el funcionamiento del sistema del lecho fluidizado, produciendo el calor necesario para el proceso de atomización de la barbotina en la planta de procesos cerámicos.

Para poder cumplir con este propósito se realizaron mezclas de biomasa con carbón térmico, a los cuales se les efectuaron pruebas físicas, químicas y térmicas, y se seleccionó aquella que presento propiedades apropiadas para el proceso del lecho fluidizado.

Este proyecto se propone como solución a una problemática ambiental, además de lograr un aprovechamiento de los recursos como el carbón y las biomásas que en la mayoría de los casos son tratadas como desecho industrial.

1. Problema

1.1. Título

MEZCLA DE BIOMASA CON CARBÓN TÉRMICO PARA SU USO INDUSTRIAL
COMO GENERADOR DE ENERGÍA DEL SISTEMA DE LECHO FLUIDIZADO

1.2. Planteamiento del problema

La planta de procesos cerámicos se dedica a la fabricación de baldosas cerámicas, durante la elaboración de los productos cerámicos esmaltados se necesita del carbón como fuente energética, la cual genera gases contaminantes como mayor fuente de emisión el dióxido de carbono (CO_2) y otros contaminantes como óxido de azufre y nitrógeno durante el proceso de combustión y se necesita de tratamiento para no ser expulsados directamente al medio ambiente. También se ha propuesto operar el equipo con otros materiales combustibles, sin embargo, para este estudio se propone evaluar la mezcla de carbón térmico y biomasas que se producen en algunos municipios del departamento de Norte de Santander como combustible alternativo para el lecho fluidizado.

Es importante evaluar las propiedades de cada material individual y los de cada mezcla para determinar el rango de uso y condiciones óptimas para su mayor aprovechamiento con el propósito de mejorar el ambiente de trabajo.

1.3. Formulación del problema

¿Qué efectividad tendrá la realización de mezclas de biomasa con carbón térmico para su uso industrial como generador de energía?

1.4. Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Conformar mezclas de biomasa con carbón térmico a nivel de laboratorio y evaluar su uso como generador de energía a nivel industrial.

1.4.2 Objetivos específicos

Hacer revisión bibliográfica.

Caracterizar física, química y térmicamente las biomásas, el carbón térmico y las mezclas entre ellos.

Evaluar el comportamiento de las mezclas de las biomásas con el carbón térmico.

Seleccionar el material orgánico que mejores características tenga para la realización de la mezcla.

1.5. Justificación

Las biomásas vegetales producidas no son utilizadas por el hombre en su totalidad lo que conlleva a que sean manejados como residuos o desechos industriales, su uso se ha limitado debido a que su composición química y características físicas son variables, por consiguiente, se deben efectuar diferentes análisis para caracterizar cada biomasa y de acuerdo a los resultados establecer los porcentajes adecuados para la mezcla.

De acuerdo a los resultados obtenidos, se comparan incluyendo las condiciones de las muestras, granulometrías y tiempos de residencia del proceso de combustión, constituyéndose como una materia alternativa para los procesos industriales que generan energía. En consecuencia, se hace necesario realizar estudios que ayuden a esclarecer dichas dudas y permita tomar decisiones correctas, para la implementación de nuevas tecnologías de generación de energía y que a su vez se tiene en cuenta los siguientes criterios: Ambiental, Económico, Energético y social.

Por tal razón se propone en esta investigación llevar a cabo estrategias orientadas hacia el mejoramiento de las condiciones ambientales de las zonas de influencia directa e indirecta que disminuya el impacto ambiental generado por la combustión del carbón que aumentan el efecto invernadero, siendo este último un factor determinante en el calentamiento global.

1.6. Alcances y limitaciones

1.6.1 Alcances

El presente proyecto inicia desde el conocimiento del proceso de combustión, de las propiedades físicas, químicas y térmicas de las biomásas y el carbón térmico para obtener entre ellos mezclas con diferentes porcentajes, en condiciones controladas para ser usadas como fuentes de energía, disminuyendo los residuos sólidos de la combustión del carbón en el lecho fluidizado, la determinación del uso de las mezclas de biomasa y carbón térmico se estima a nivel de laboratorio.

1.6.2. Limitaciones

En el desarrollo del proyecto se presentó dificultades tales como: contratiempos en la recolección de las muestras, costo de los análisis para realizar un estudio más detallado,

disponibilidad de los equipos para la preparación de muestras, mayor cantidad de pruebas de las mezclas de biomasa para mejorar los parámetros de calidad ya que las pruebas a realizar son a pequeñas escalas.

1.7. Delimitaciones

1.7.1 Delimitación espacial

El proyecto se llevará a cabo en la planta de procesos cerámicos., San José Cúcuta y en la facultad de ingeniería de la Universidad Francisco de Paula Santander, seccional Cúcuta. En las instalaciones del laboratorio de Carbones de la Universidad Francisco de Paula Santander.

1.7.2 Delimitación temporal

El tiempo estimado para lograr el objetivo primordial de este proyecto es de aproximadamente de 3 meses a partir de la fecha de aprobación por el comité.

1.7.3 Delimitación conceptual

Los términos necesarios que se manejan como referentes primarios para el proyecto son:

Biomasa

Carbón

Combustión

Composición química

Emisiones atmosféricas

Laboratorio

La contaminación

Lecho Fluidizado

Material particulado

Mezcla

1.8. Marco referencial

1.8.1 Antecedentes

Penedo, M., Manals, E., y Giralt, G. (2011). *Análisis termogravimétrico y térmico diferencial de diferentes biomásas vegetales* vol.31 no.2, Santiago de Cuba. Universidad de Oriente, Facultad de Ingeniería Química. El objetivo de esta investigación es realizar análisis termogravimétrico y térmico diferencial practicados a cuatro tipos de biomásas vegetales como el bagazo de caña, cascarilla de café, aserrín de pino y residuo de tabaco donde se pudo determinar pérdida de masa en función de la temperatura (TG), una a temperatura inferior a 200 °C, etapa en la cual se evapora la humedad y se liberan el CO y CO₂. Luego se obtuvo mayor pérdida de masa, entre 200 y 400 °C, donde tiene lugar la descomposición de celulosa y hemicelulosa; y una tercera etapa de menor pérdida de masa, a temperatura por encima de 580 °C, donde ocurre la descomposición de la lignina, dando como resultado que la mayor descomposición fue el bagazo de caña con el 70 % se descompuso ocurriendo la mayor pérdida de masa a 325 °C.

Cutimbo, M. (2017). *“Estudio exploratorio del proceso de combustión de carbón y biomasa mediante análisis termogravimétrico para su aprovechamiento en la generación de calor”* Bogotá, Colombia Págs. 92. Universidad Nacional de Colombia Facultad Ingeniería Departamento de Ingeniería Química. El objetivo de este estudio es realizar análisis termogravimétrico al carbón bituminoso y bagazo de caña de azúcar para mejorar la ignición del carbón, con lo cual contribuye a la disminución de costos relacionados con el proceso de generación de calor. En la cual se desarrollaron cuatro regiones: secado, adsorción de oxígeno, desvolatilización / pirólisis y carbonización. Donde se encontró como resultado que el contenido

de bagazo no influye sobre los parámetros característicos de la combustión y que las condiciones óptimas para la combustión fueron: velocidad de calentamiento (14°C/min), concentración de oxígeno en la atmósfera reactiva (22 % O₂ / 88 % N₂) y tamaño de partícula 75µm.

Rodríguez, W. (2010) “*Optimización de producción de briquetas de carbón y biomasa*”, Lima Perú. Págs.86, para optar el título profesional de ingeniero metalurgista, Universidad Nacional de Ingeniería Facultad de Ingeniería Geológica, Minera y Metalúrgica. El objetivo de esta investigación es fabricar briquetas de carbón y biomasa haciendo útiles el recurso carbón mineral, materiales forestales y subproductos orgánicos para uso industrial y doméstico, donde realizaron estudio del mercado, independiente de la condición económica en muchas áreas de aplicación en procesos y lugares de consumo dentro de la región nacional, así como la posibilidad de comercialización a otros países que no cuentan con el producto. En la investigación realizaron técnicas particulares con parámetros de presión, humedad y temperatura, dando como resultado que la producción de briquetas de carbón mineral y biomasa controlada cumplieron con las características adecuadas, logrando exigencias comerciales en la composición química, propiedades físicas y con características medioambientales ecológicas.

San miguel G y Gutierrez F. *Tecnologías para el uso y transformación de biomasa energética*. España. Mundi-prensa. 2015. Págs. (1-133). El objetivo de esta investigación es que la biomasa constituye una fuente energética de gran interés, siendo en la actualidad el recurso renovable más utilizado en el planeta, sobre todo en sus formas tradicionales. Ello debe dar paso al desarrollo de técnicas avanzadas que permitan producir energía con elevadas prestaciones, altas eficiencias, bajas emisiones y a un coste competitivo. Algunas de estas tecnologías se encuentran ya en plena fase comercial y otras aún en desarrollo, abarcando una gran variedad de materias primas y de procesos que pueden usarse con fines energéticos muy diversos.

Patiño P. *Biomasa: estudio de factibilidad para implementar un sistema de generación de energía a partir de residuos vegetales*. 2014, Bucaramanga. Págs. 87. Trabajo de tesis para optar el título de Magíster en Sistemas Energéticos Avanzados, universidad de Santander. Objetivo de este trabajo es implementar un sistema de generación de energía auxiliar a partir de fuentes renovables, mediante la selección de una tecnología de conversión de biomasa residual, para dicha generación se hizo una cualificación y una cuantificación del potencial energético, y se analizaron las diferentes tecnologías de transformación de residuos vegetales, entre estas se determinó que la tecnología de transformación más factible, es un digestor anaerobia porque es ambientalmente equilibrada, es decir no genera gases de efecto invernadero y durante la construcción del sistema no genera mayor impacto al suelo y al aire.

Bolívar J y Hernández Y. *Análisis de viabilidad de la utilización de biomasa para la generación de energía en la sede utopía de la universidad de la Salle*. 2013, Bogotá. Págs. 95. Proyecto de grado presentado para optar por el título de Ingeniero electricista Universidad de la Salle, facultad de ingeniería programa ingeniería eléctrica. El objetivo de esa investigación es proponer un modelo de generación de energía ya sea térmica eléctrica o de fuerza usando como fuente energética la biomasa disponible en la sede de la Universidad de la Salle en Yopal “UTOPIA”. En el presente estudio se desarrolló la caracterización de la biomasa disponible en la sede UTOPIA y sus alrededores, en esta fase se estudiaron los tipos de cultivos, características energéticas, cantidad, disponibilidad, costo, porcentajes de recolección y cantidad de cosechas al año; donde se obtuvo como resultado que el biogás producido por el biodigestor resulta ser suficiente para cubrir la demanda energética, sin embargo, recomienda tener en cuenta la posibilidad de implementar un sistema de combustión directa realizando mezclas de las

diferentes materia primas disponibles, y creando un sistema de recolección y almacenamiento para cubrir el tiempo en el cual los cultivos no produzcan biomasa aprovechable.

1.8.2 Marco teórico

1.8.2.1 Leyes de termodinámica

La termodinámica es la disciplina que dentro de la ciencia madre, la Física, se ocupa del estudio de las relaciones que se establecen entre el calor y el resto de las formas de energía. Entre otras cuestiones la termodinámica se ocupa de analizar los efectos que producen los cambios de magnitudes tales como: la temperatura, la densidad, la presión, la masa, el volumen, en los sistemas y a un nivel macroscópico.

La base sobre la cual se ciernen todos los estudios de la termodinámica es la circulación de la energía y cómo ésta es capaz de infundir movimiento.

En tanto, la termodinámica presenta tres leyes fundamentales, la primera ley se conoce popularmente como el principio de conservación de la energía y sostiene que, si un sistema intercambia calor con otro, su propia energía interna cambiará. En este caso, el calor será la energía necesaria que deberá intercambiar un sistema para compensar las diferencias entre la energía interna y el trabajo.

Por su lado, la segunda ley, propone distintas restricciones para las transferencias de energía, que podrían concretarse si se tiene en cuenta la ley primera; el segundo principio habla de la regulación de dirección en la cual se llevan a cabo los procesos termodinámicos, imponiendo la posibilidad de que los mismos se desarrollen en sentido contrario. Esta segunda ley se encuentra

apoyada en la entropía (magnitud física que mide parte de la energía que podrá utilizarse para producir trabajo).

Y la tercera y última ley sostiene que es imposible alcanzar una temperatura que sea igual a cero absoluto a través de un número finito de procesos físicos. Los procesos más importantes que tienen lugar en la termodinámica son: isotérmicos (la temperatura no se modifica), isobáricos (la presión no se modifica), isócoros (el volumen no cambia) y adiabáticos (no se produce transferencia de calor).

En resumen, las leyes de termodinámicas son:

- LEY CERO: Llamada también Ley del equilibrio térmico
- PRIMERA LEY: La energía no se crea ni se destruye, solo cambia o se transfiere.
- SEGUNDA LEY: Todo el trabajo mecánico puede transformarse en calor, pero no todo el calor puede transformarse en trabajo mecánico.
- TERCERA LEY: No se puede alcanzar el cero absoluto.

Ucha, F (2010) Definición de Termodinámica. Recuperado de <https://www.definicionabc.com/ciencia/termodinamica.php>

1.8.2.2 Composición de la biomasa

La biomasa vegetal está compuesta aproximadamente por tres cuartas partes de agua y una cuarta de materia seca, que a su vez se compone de compuestos minerales inorgánicos y compuestos orgánicos.

La materia orgánica seca está constituida por (Porta et al., 2003):

Hidratos de carbono: generalmente se encuentran como polisacáridos, unidos mediante enlaces O-glicosídicos.

Celulosa: es un homopolisacárido que puede tener desde cientos a miles de monómeros de β -glucosa. Tiene una estructura fibrosa, formada por cadenas de glucosas que se entrelazan mediante puentes de hidrógeno de los grupos hidroxilo, dando lugar a fibras impermeables que constituyen la pared celular de las células vegetales.

Hemicelulosa: es un heteropolisacárido formado por distintos tipos de monómeros. La hemicelulosa forma parte de las paredes de las células vegetales, recubriendo la superficie de las fibras de celulosa y permitiendo el enlace de pectina.

Lignina: es el polímero natural más complejo en relación a su estructura y heterogeneidad. La molécula de lignina presenta un elevado peso molecular, que resulta de la unión de varios ácidos y alcoholes fenilpropílicos (cumarílico, coniferílico y sinapílico). El acoplamiento aleatorio de estos radicales da origen a una estructura tridimensional, polímero amorfo, característico de la lignina. Proporciona rigidez a la pared celular y resistencia de los tejidos lignificados al ataque de los microorganismos, impidiendo la penetración de las enzimas destructivas en la pared celular.

Taninos: químicamente son metabolitos secundarios de las plantas, fenólicos, no nitrogenados. Son compuestos de peso molecular elevado, que se localizan sobre todo en las hojas y la corteza, retardando la descomposición de la materia orgánica.

Proteínas: son polipéptidos, cadenas de aminoácidos de alto peso molecular.

Lípidos: son ácidos grasos, ceras y resinas entre otros compuestos que actúan como fuentes de energía y de protección de las plantas.

Perez, A., Borrego, A., Sierra, M., Y Martin, A (2019). Composición de las biomásas. Recuperado de <https://petrografiacarbon.es/introduccion/materia-organica/biomasa/>

1.8.2.3. Propiedades del carbón

Carbón El carbón puede definirse como una roca sedimentaria, combustible, compuesto de una fracción orgánica (macerales) y una fracción inorgánica (minerales). La fracción orgánica proviene de procesos bioquímicos y geoquímicos de transformación de biomasa, que junto con los minerales propios de ésta y los introducidos por la sedimentación y compactación le confieren al carbón un carácter extremadamente complejo y heterogéneo.

Caracterización del carbón El conocimiento de las propiedades químicas y físicas del carbón es estratégico para mejorar el rendimiento de los procesos energéticos. En la caracterización química generalmente se realizan el análisis próximo, análisis último y poder calorífico. El análisis próximo del carbón (ASTM D3172, D5142, D7582) se define como la determinación de humedad, cenizas, materia volátil y carbono fijo y brinda la información del comportamiento del carbón durante el calentamiento. Para fines comerciales e industriales se realiza la determinación del poder calorífico (ASTM D2015, D3286, D5865D) que da información de la energía química almacenada y que puede liberarse en los procesos de conversión. El análisis último o elemental de carbón (ASTM D3176, D4239, D5016, D5373) se determina con base a métodos de oxidación, descomposición y/o reducción, siendo realizados en la actualidad mediante equipos

automáticos basados fundamentalmente en la combustión de la muestra y el análisis de los productos de oxidación por la técnica de infrarrojo para el caso de los elementos carbono, hidrógeno y azufre; para el nitrógeno sus óxidos se reducen y se analiza por conductividad térmica como nitrógeno elemental y el oxígeno se analiza también por conductividad térmica o se calcula por diferencia. Adicionalmente, se consideran los datos de humedad y contenido en cenizas del análisis próximo, con objeto de expresar los resultados del análisis elemental en porcentaje en masa y base seca exenta de cenizas. Este análisis es importante para los balances de materia y energía de la combustión y para la prueba de eficiencia de las calderas. La caracterización física se aplica en términos del manejo del carbón y su tratamiento en planta, considerando propiedades como la dureza/abrasividad (ASTM D409) que están relacionadas con la facilidad de molienda y el desgaste de los molinos. El índice de hinchamiento (ASTM D720) indica el comportamiento aglomerante cuando el carbón se calienta; esta propiedad termoplástica es particular para cierto tipo de carbones y corresponde a transformaciones fisicoquímicas complejas, producto de la coalescencia de las partículas. Durante este proceso se producen cambios irreversibles por descomposición pirolítica, donde la masa aglomerada se re-solidifica para formar un carbonizado más duro que no beneficia el proceso de combustión, por lo que, se requiere disminuir el tiempo de calentamiento, o realizar la pirólisis de manera rápida para evitar este fenómeno. La fusibilidad de las cenizas (ASTM D1857) es una prueba que indica la fusión y reblandecimiento de las cenizas de carbón en el proceso térmico, siendo importante para la predicción de formación escoria en las calderas.

Cutimbo M, A (2017). Propiedades del carbón. Recuperado de <file:///G:/anteproyecto%20de%20cenizas/tesis%20de%20cenizas%20de%20carbon/Tesis%20Maestría.pdf>

1.8.3. Marco legal

Normas ASTM D2234. Con esta norma se pretende proporcionar una muestra representativa de carbón un lote. Debido a la variabilidad de carbón y de la amplia variedad de equipos de muestreo, se indican las precauciones en todas las etapas de muestreo, de las especificaciones del sistema, y la adquisición de equipos para obtener la muestra final.

1982 Decreto 2 de 1982 Nivel Nacional. Reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 09 de 1979 y el Decreto Ley 2811 de 1974, en cuanto a emisiones atmosféricas. Normas de calidad del aire y métodos de medición, normas especiales de emisión de partículas para algunas fuentes fijas artificiales calderas a base de carbón, normas de emisión de dióxido de azufre (SO₂) y neblina ácida (SO₃ y H₂SO₄) para algunas fuentes fijas artificiales plantas productoras de ácido sulfúrico, normas de emisión para plantas de ácido nítrico e incineradores plantas de ácido nítrico, métodos de medición de emisiones por chimeneas o ductos en las fuentes fijas artificiales y de contaminación del aire, selección del sitio de muestreo, determinación del número de puntos y su localización en chimeneas y ductos de fuentes fijas artificiales, determinación del contenido de humedad de las emisiones, determinación de la emisión de partículas por chimeneas o ductos de fuentes fijas artificiales, determinación de la emisión de dióxido de azufre y neblina ácida por chimeneas o ductos de plantas de ácido sulfúrico, mantenimiento y fallas en los equipos de control, estudios de impacto ambiental, quemas abiertas, tasas retributivas, registro para fuentes fijas artificiales, autorizaciones sanitarias de funcionamiento y planes de cumplimiento para

fuentes fijas artificiales existentes, autorizaciones sanitarias de instalación para fuentes fijas artificiales nuevas y de las sanitarias provisionales de funcionamiento para ampliación o modificación de las existentes, disposiciones comunes sobre autorizaciones sanitarias, vigilancia, control y sanciones.

Decreto 948 de 1995 Nivel Nacional. Se reglamentan la Ley 23 de 1973, el Decreto Nacional 2811 de 1974, la Ley 9 de 1979 y la Ley 99 de 1993, en relación con la presión y el control de la contaminación atmosférica y protección de la calidad del aire.

Resolución 6982 de 2011 Secretaría Distrital de Ambiente. Dicta normas sobre prevención y control de la contaminación atmosférica por fuentes fijas y protección de la calidad del aire. De igual manera establece las normas y los estándares de emisión admisibles de contaminantes al aire para fuentes fijas en el período urbano del Distrito Capital para todas las actividades industriales, comerciales y de servicio, los equipos de combustión externa, presentes en el perímetro urbano del Distrito Capital.

Sentencia T-154 de 2013 Corte Constitucional Sin duda, la explotación, transporte y almacenamiento de carbón genera dispersión de partículas, que afectan la pureza del aire, al igual que la tierra y el agua donde finalmente caen. En tal virtud, esas actividades deben estar sometidas a vigilancia, con específicas y severas medidas sanitarias y de control, tendientes a proteger la indemnidad del ambiente, el bienestar general y, particularmente, la salud y demás derechos de la población circunvecina. Tal actividad de vigilancia está regulada en Colombia en la Ley 9 de 1979, por la cual se dictan medidas sanitarias, que, en materia de protección del ambiente en cuanto a emisiones atmosféricas, asignaba al Ministerio de Salud el deber de

reglamentar la preservación de la calidad del aire, según los postulados de esa Ley y del Decreto Ley 2811 de 1974, Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente.

2. Diseño metodológico

2.1. Tipo de investigación

Se realizará una investigación mixta: una investigación documental ya que se utiliza técnicas muy precisas de la documentación existente, que directa o indirectamente aporte información al proyecto e investigación experimental porque se realizarán estudios de laboratorio como es análisis simultáneo, análisis termogravimétrico y calorimetría diferencial de barrido, cuantitativo sobre perla de difracción de rayos X por longitud de onda (cascarilla de arroz, cisco de café y aserrín), análisis elemental cuantitativo por fluorescencia de rayos X de longitud de onda utilizando el método Rietveld, índice de hinchamiento, análisis próximo completo, fusibilidad de cenizas en atmosfera reductora y oxidante y análisis últimos (carbón), con seguimiento y control para efectuar un análisis de los cambios en la composición físico-química y propiedades de las muestras desde el inicio hasta el final del proceso al que van a ser sometidas para obtener las mezclas.

2.2. Población y muestra

2.2.1. Población

El objeto de estudio son las mezclas de biomásas con carbón térmico para la generación de energía, las cuales son pilas de carbón y biomasa que están localizadas en el patio de acopio de la planta de procesos cerámicos.

2.2.1. Muestra

El muestreo del carbón se realizó manualmente con una pala, el sitio de muestreo fue ubicado en el punto de descarga de la banda transportadora que evacua el material de la tolva de alimentación. Estas muestras se llevaron al laboratorio con el fin de efectuar los análisis físicos, químicos y térmicos.

Se tomaron muestras de biomásas de las pilas que están depositadas en el patio de acopio de la empresa de productos cerámicos, las cuales fueron adquiridas en la región, estas muestras se llevaron al laboratorio con el fin de efectuar los análisis físicos, químicos y térmicos.

2.3 Instrumento para la recolección de información

Fuentes primarias: Las fuentes primarias de este proyecto serán los resultados de los ensayos que se le realizará a las diferentes muestras y a las observaciones directas en el área de trabajo.

Fuentes secundarias: Entre las fuentes secundarias que servirán de apoyo se encuentra parte de la documentación de la empresa, libros, proyectos de grado, documentación de internet y base de datos suministradas por parte de la biblioteca de la universidad relacionados con las biomásas y su uso industrial.

2.4. Técnicas de análisis y procedimiento de datos

Los procedimientos que se realizarán en planta y el laboratorio se efectuarán de manera consecutiva ya que a medida que se avance en la ejecución del proyecto, los datos obtenidos se irán registrando en bases de datos en Excel a fin de presentar gráficas y tablas que permitan evaluar e interpretar las variables a estudiar.

2.5 Presentación de resultados

Se incluirán las características de las biomásas y el carbón térmico, además del comportamiento de las mezclas con cada uno de las biomásas, evaluando las propiedades obtenidas y posteriormente seleccionar la mezcla con mejores características.

3. Desarrollo

Fundamentos Teóricos

3.1. Combustor de lecho Fluidizado.

Un lecho fluidizado se forma cuando se hace pasar un fluido, regularmente de abajo hacia arriba, por un lecho de partículas que se encuentra sostenida por un distribuidor. Cuando las partículas empiezan a fluidizar, la presión en el lecho se va incrementando linealmente conforme se va aumentando la distancia entre las partículas y la superficie (Prada, s, f. 2014).

3.1.1 Proceso de combustión en lecho fluido.

La combustión del lecho fluido comprende entre otros los siguientes procesos: fluidización de sólidos, combustión propiamente dicha, transferencia de calor; extracción de material agotado, reducción de tamaño de las partículas, emisiones de contaminantes, calcinación, etc. (Véase figura 1).

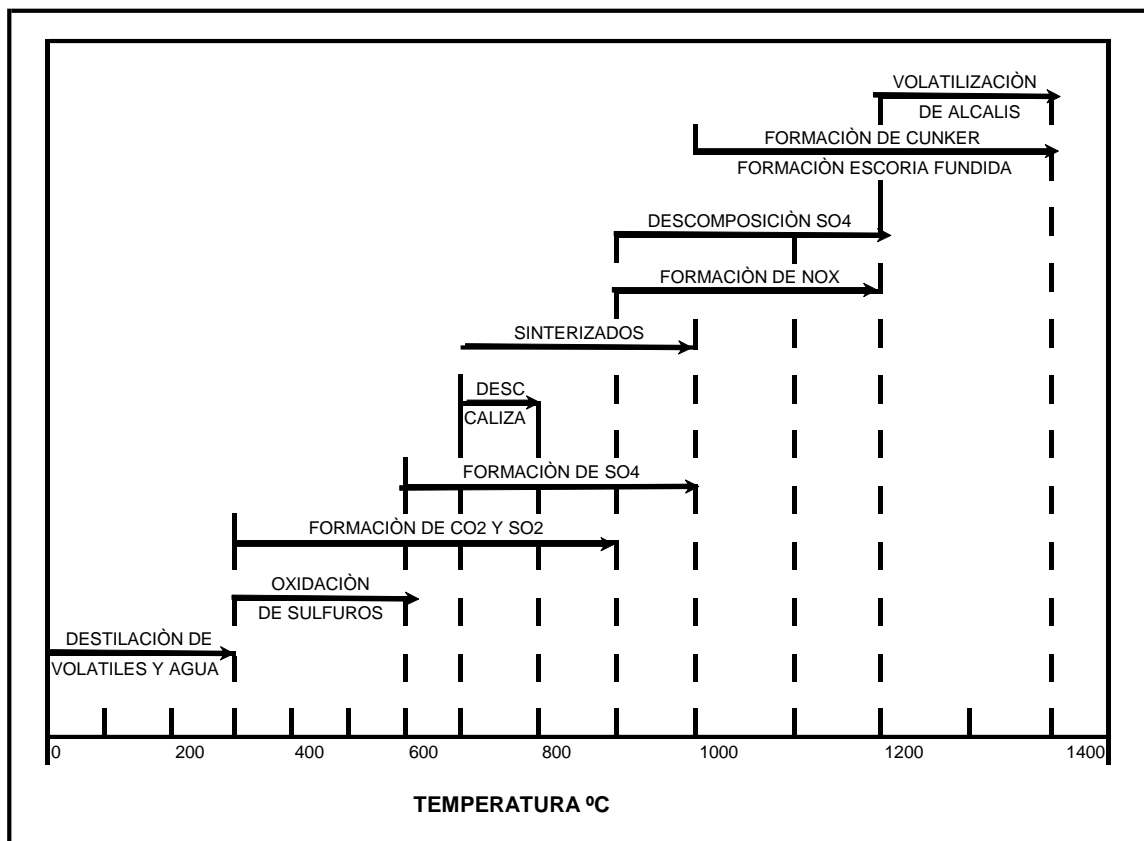


Figura 1 Procesos físicos químicos que tienen lugar en la combustión en lecho fluido.

Fuente: Centrales térmicas. Sistema de combustión en lecho fluido.

Autor: Ismael prieto, 2005.

En la combustión de un lecho fluidizado el combustible se alimenta continuamente al lecho y la ceniza producida en la combustión se extrae con la misma frecuencia, de modo que el volumen se mantiene constante.

El aire es inyectado a través de una parrilla distribuidora en el fondo del lecho, regulando la velocidad de fluidización. Los gases de la combustión salen por la parte superior, para el control de la temperatura es entre 800-900°C.

Cuando se alimenta combustible al lecho las partículas adquieren rápidamente alta temperatura debido a su rápido proceso de mezclado y a la buena transmisión de calor que se da en el mismo, el tiempo de residencia de las partículas de carbón en el lecho es variable y depende del tipo de combustible y el tamaño de las partículas. En el proceso de calentamiento se desprende primero la humedad y luego las materias volátiles (hidrogeno, metano, monóxido de carbono, etc.) quemando finalmente el carbón (Prieto, s, f. 2005).

3.1.2 Eficiencia de la combustión.

La eficiencia de la combustión depende de diversos factores (Prieto, s, f. 2005):

La temperatura del lecho

Exceso del aire

Reactividad del combustible

Tamaño de las partículas del material

Velocidad de fluidización

Tiempo de residencia

Grado de reciclado del material

3.2. Carbón Térmico.

El carbón es una roca sedimentaria de color negro, muy rica en carbono y con cantidades variables de otros elementos, principalmente hidrógeno, azufre, oxígeno y nitrógeno, utilizada como combustible fósil (Blander, 2010). La fracción orgánica proviene de procesos bioquímicos

y geoquímicos de transformación de biomasa que junto con los minerales propios de ésta y los introducidos por la sedimentación y compactación le confieren al carbón un carácter extremadamente complejo y heterogéneo, puede estudiarse mediante el análisis petrográfico que permite describirla a partir de sus componentes microscópicos según su capacidad de reflexión de luz, tamaño, anisotropía, o fluorescencia estableciendo tres grandes grupos macerales: vitrinita, huminita, liptinita, exinita e inertinita (Mejía, Convers, & González, 2006).

La Vitrinita es el principal constituyente del carbón (60-90% en volumen) y mediante la evaluación de su reflectancia se establece el rango o madurez del carbón; este maceral se originó a partir del tejido leñoso y cortezas del material vegetal. La Liptinita es la fracción rica en hidrógeno en la estructura del carbón, se formó a partir de las algas y de diferentes partes de las plantas (esporas, cutículas y resinas). La Inertinita es de forma granular compuesta por vegetal altamente deteriorado y por material carbonoso oxidado.

El análisis petrográfico es de gran importancia por ser una técnica que puede emplearse en la formulación de modelos matemáticos del comportamiento del carbón para diferentes procesos y en la determinación de su reactividad a partir de sus componentes individuales (Cutimbo, M, 2017).

3.2.1. Tipo de muestreo

Muestreo durante la Operación Minera. El sistema de muestreo en la fase de producción depende del sitio donde es tomada la muestra, si el material proviene (Baez, s,f 2004):

De un flujo móvil de una banda.

De un flujo móvil discontinuo (ejemplo: un cargador de canasta).

En un punto de descargue de un flujo en movimiento continuo.

De una banda parada.

El muestreo puede ser manual o mecánico y puede realizarse en bandas transportadoras, en volquetas o camiones, en vagones, en barcazas, en barcos y en pilas.

A continuación, se enumeran en forma general, los principales tipos de muestreo de producción:

Muestreo de volquetas

Muestreo camiones o vagones:

Este muestreo puede hacerse antes, durante o después del descargue. El muestreo antes del descargue se hace sobre el platón o carrocería de la siguiente manera:

Remoción de una capa de por lo menos 30 cm.

Elección de los lugares de muestreo por un sistema de líneas paralelas en zigzag a Intervalos regulares, de acuerdo con el tamaño del platón de la volqueta.

Toma del incremento con una pala en cada sitio elegido.

Evitando la toma de muestras de un solo lado de la volqueta o muy superficiales.

En caso de que se encuentren pedazos grandes en el punto de muestreo, se deben tomar pequeñas porciones de cada trozo.

Si el muestreo es durante el descargue, la muestra debe abarcar todo el ancho del material en

movimiento o se debe tomar como mínimo en tres lugares del ancho total y se debe efectuar durante todo el descargue.

Si la toma de muestras es después del descargue, se deben tomar los incrementos a diferentes alturas de talud en forma de espiral, retirando previamente una capa delgada del último carbón descargado.

Muestreo de Pilas:

Para el muestreo de pilas se deben tener en cuenta los siguientes aspectos:

Cada incremento tomado representa solo una pequeña zona correspondiente al área y profundidad donde se toma.

En apilamientos de carbones en áreas separadas, se debe tomar una muestra bruta de cada área.

Realizar la colecta de los incrementos en puntos uniformemente espaciados sobre la superficie de carbón expuesto.

En pilas muy grandes, se recomienda diseñar un plan de muestreo sobre un plano.

El dispositivo de muestreo debe ser adecuado para alcanzar la base de la pila en cualquier sitio.

La capa superficial generalmente presenta calidad diferente debido a la exposición al aire, segregación, menor contenido de humedad.

Abrir con palas para llegar al fondo de las pilas, de tal manera que las paredes formadas

tengan un ángulo menor al ángulo natural de reposo; en estos casos se deben tomar los incrementos desde el fondo del hueco hasta el tope.

Muestreo en Bandas Transportadoras:

Es el sistema de muestreo más confiable ya sea en banda estacionaria (detenida para la toma de muestras) o en movimiento. Deben tenerse en cuenta las siguientes consideraciones:

El muestreo se puede efectuar a mano con los equipos apropiados (palas, Cucharones, separadores, etc.)

Tomar los incrementos a todo lo ancho y alto del flujo de carbón.

El lapso entre la toma de incrementos sucesivos, para evitar errores sistemáticos, no debe coincidir con ninguna periodicidad natural en la cantidad o calidad del carbón a muestrear.

Si los incrementos se toman a intervalos iguales de tiempo, sus pesos deben ser proporcional a la velocidad de flujo; si ocurre lo contrario, los incrementos deben tener igual peso.

3.2.2. Muestreo para propósitos especiales.

Hace referencia a las muestras que se toman con un objetivo específico, en el cual la metodología y la muestra final obtenida debe cumplir ciertas condiciones particulares, se pueden identificar los siguientes tipos (Baez, s,f 2004):

1. Muestras de uso industrial.
2. Muestras para uso científico.
3. Muestras para caracterización petrográfica.

4. Muestras para caracterización palinológica.
5. Muestras para caracterización química.
6. Muestras para caracterización física.
7. Muestras para propósitos educativos.

3.2.3. Parámetros generales de clasificación.

Existen varios criterios para efectuar la diferenciación de los carbones y en algunos casos se debe a conveniencias locales, por lo tanto, hay un gran número de clasificaciones existentes siendo particular para cada país. La mayoría de los sistemas utilizan:

Parámetros que miden el grado de carbonificación o rango de los carbones.

El modo de descomposición y la naturaleza específica de la materia fósil (tipo).

Las características tecnológicas y de utilización de recursos basados en los análisis elementales.

Los parámetros tecnológicos, corresponde a aquellos procedimientos analíticos de laboratorio que se utilizan para distinguir los carbones según su comportamiento en estos procesos. No hay relación precisa del comportamiento entre la composición elemental y las propiedades tecnológicas del carbón, presentan contenidos de materia mineral en cantidades variables y no se encuentra relacionada con el rango, por consiguiente, la mayoría de los sistemas de clasificación se basan en los análisis hechos sobre la base exenta de materia mineral o seca y exenta de cenizas. El desarrollo de los numerosos sistemas nacionales de clasificación se ha basado en la necesidad de ajustar las características de los carbones locales a las necesidades de los usuarios

(Baez, s,f 2004).

3.3 Biomosas

Es toda materia orgánica de origen vegetal o animal, incluyendo los procedentes de su transformación natural o artificial. Los árboles, cultivos de alimentos y forrajes, constituye lo que denomina biomasa primaria o residuos agrícolas, los forestales, animales, industriales y urbano conforma a la biomasa secundaria (Subero & Pallarés, 2010).

En la producción de biomasa, las plantas transforman la energía radiante del sol en energía química a través de la fotosíntesis, y parte de esa energía química queda almacenada en forma de materia orgánica que puede recuperarse por combustión directa o transformación en combustibles a través de diferentes procesos. En la figura (2), adjunta se puede ver la situación de la biomasa dentro de las energías renovables.

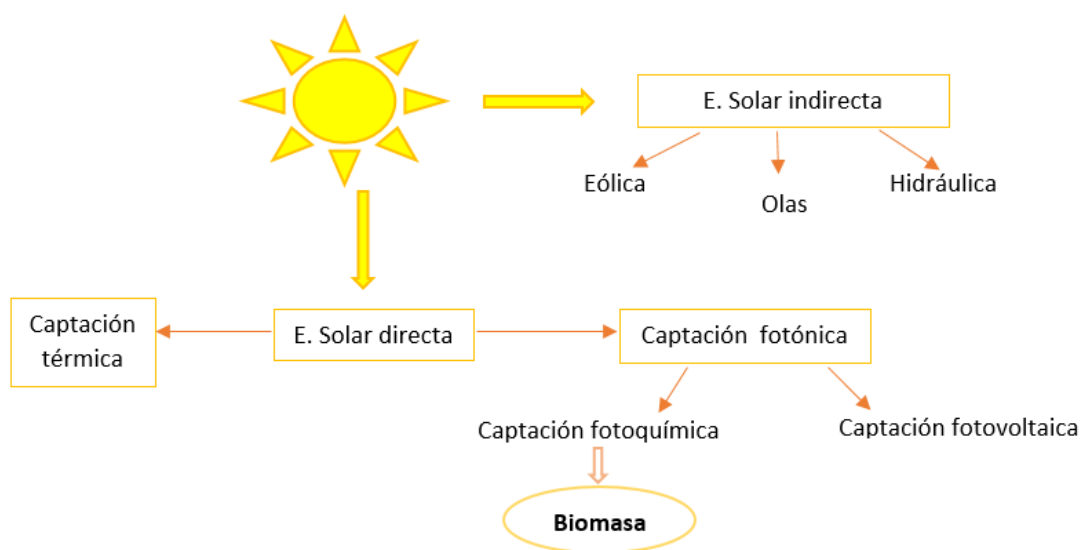


Figura 2 Biomasa.

Fuente: Meteorología en Red, s,f.

Autor: Santiago García Garrido, 2009-2015, centrales termoeléctricas de la biomasa.

La biomasa puede provenir de fuentes como las cosechas de plantaciones perennes, las herbáceas de cosecha anual, las gramíneas y las oleaginosas, entre otras. También se obtiene de los residuos de la agricultura, de la industria procesadora de alimentos, de la industria manufacturera de productos de madera y de los residuos sólidos de fuente industrial y municipal. Actualmente se estima una contribución cercana al 10 % por parte de los combustibles a partir de biomasa en el suministro primario de energía en el mundo, siendo en promedio del 5 % en los países industrializados y cerca del 30 % en los países en vías de desarrollo (Rodríguez, 2010).

La biomasa se caracteriza por tener un bajo contenido de carbono, un elevado contenido de oxígeno y compuestos volátiles. Estos compuestos volátiles (formados por cadenas largas del tipo C_nH_m , y presencia de CO_2 , CO e H_2) son los que concentran una gran parte del poder calorífico de la biomasa. El poder calorífico de la biomasa depende mucho del tipo de biomasa considerada y de su humedad. Así normalmente estos valores de poder calorífico de la biomasa se pueden dar en base seca o en base húmeda.

En general se puede considerar que el poder calorífico de la biomasa puede oscilar entre los 3.000 – 3.500 kcal/kg para los residuos ligno - celulosos, de 2.000 – 2.500 kcal/kg para los residuos urbanos y finalmente 10.000 kcal/kg para los combustibles líquidos provenientes de cultivos energéticos. Estas características junto con el bajo contenido de azufre en la biomasa la convierten en un producto especialmente atractivo para ser aprovechado energéticamente (Coordinación de Energías Renovables, 2008).

La energía que acumula la biomasa tiene su origen en el sol: a partir del proceso denominado fotosíntesis, las plantas absorben energía lumínica del sol, agua del suelo y el CO_2 de la atmósfera, almacenando en ellas sustancias orgánicas (energía) y liberando oxígeno durante el

proceso. (Véase figura 3)

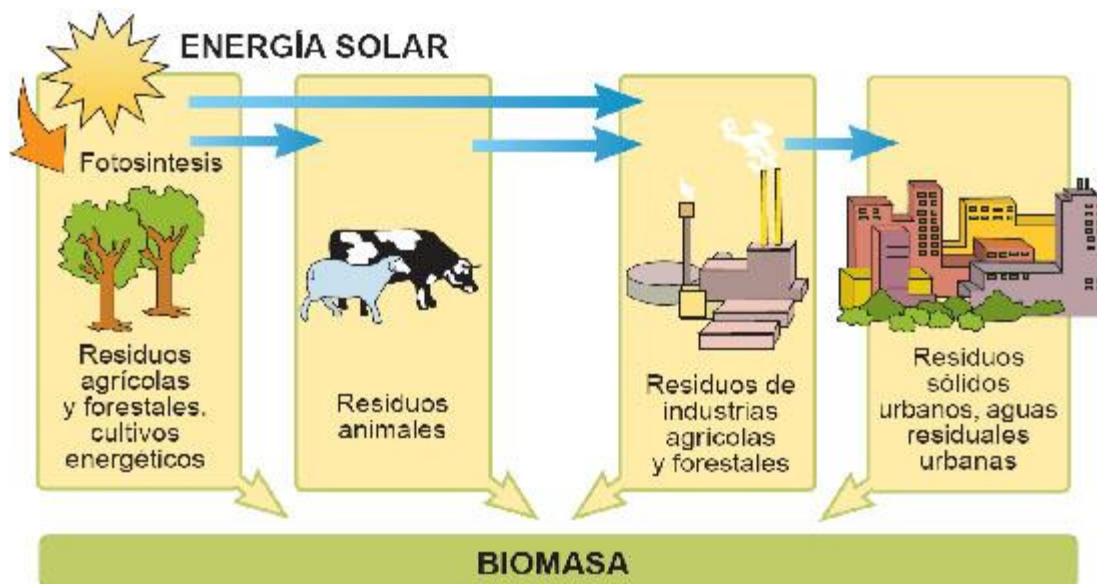


Figura 3 Tipos de biomasa

Fuente: Minenergia, s.f.

Autor: Krista I. Aguilar O, 2014, seguridad energética.

En la composición de la biomasa se encuentran grandes cantidades de carbono, oxígeno e hidrógeno. Las cadenas largas de tipo C_nH_m ; constituyen los compuestos involucrados en las reacciones exotérmicas generadoras de energía (Bhattacharya, Junfeng, Runqing, Yanquin, Jingl & Salam, 2005). Por consiguiente, la biomasa presenta una gran cantidad de energía almacenada en su conjunto de componentes orgánicos de origen vegetal y animal; ejemplo, cualquier especie y sus residuos contienen energía (Mckendry, 2002).

Cuando la biomasa se somete a un proceso de combustión, el aporte al calentamiento global por sus emisiones de CO₂ es neutro (Miltner, Makaruk Harasek & Friendo, 2006), lo cual significa que su uso como recurso energético no contribuye a aumentar la proporción de CO₂ en la atmósfera, siempre y cuando exista un balance cero entre la biomasa producida por el medio natural y la usada en la producción de energía.

La valorización energética de la biomasa está dada por la cantidad de energía que contiene y que puede llegar a liberar cuando se somete a un proceso de conversión energética. Las características de la biomasa la convierten en una fuente atractiva para ser aprovechada energéticamente.

3.3.1 Tipos de biomasa según su origen (De Lucas, Del peso, Rodríguez y Prieto, 2012)

3.3.1.1 Natural. Es la biomasa que se produce de forma espontánea en la naturaleza, en ecosistemas que no han sufrido intervención humana. Su explotación, en general, no es interesante por razones económicas ya que la gestión de la adquisición y transporte de las materias primas al lugar de utilización no son rentables. A pesar de ello, hoy en día constituye la principal fuente energética de pequeñas localidades y de países en vías de desarrollo.

3.3.1.2 Residual. Consiste en la biomasa que procede de los residuos generados por el desarrollo de diferentes actividades humanas y los vertidos denominados biodegradables. Se clasifican en secos y húmedos, o en sólidos y líquidos y entre ellos pueden citarse:

Residuos de actividades agrícolas, forestales y de jardinería: pajas de cereales, zuros de maíz, excedentes agrícolas, los originados en los tratamientos silvícolas, etc.

Residuos de industrias agrícolas y forestales: como las provenientes de la producción de

aceite de oliva, aceite de orujo de oliva, industria vinícola y alcoholera, producción de frutos secos, recortes de madera, aserrín, etc.

Residuos sólidos urbanos (RSU) y aguas residuales urbanas (ARU).

Residuos ganaderos: principalmente purines.

Residuos agroindustriales: industrias lácteas, papeleras, destilerías, almazaras, conserveras, etc.

Aceites alimentarios usados.

3.3.1.3 Cultivos energéticos. Son aquellos cultivos con fines no alimentarios destinados a la producción de energía. A diferencia de los cultivos agrícolas alimenticios, los agroenergéticos son seleccionados en base a la producción de cantidad de biomasa y no de calidad y suelen ser especies caracterizadas por su robustez a fin de abaratar los costos de cultivo y el precio de la biomasa final (De Lucas, Del Peso, Rodríguez & Prieto, 2012).

3.3.2 Clasificación según su estado (Castells, 2012).

3.3.2.1 Biomasa sólida: Este tipo de biomasa es el más conocido y en el podemos englobar la madera obtenida de tratamientos silvícolas forestales, residuos de las industrias que trabajan con cualquier tipo de biomasa (carpinterías, papeleras etc.), residuos obtenidos en las podas y limpieza de parques y jardines, subproductos o residuos de la naturaleza agrícola (ej, paja) cultivos energéticos, turba residuos agroindustriales (orujo, serrín, huesos de aceituna) fracción orgánica de residuos sólidos urbanos.

3.3.2.2 Biomasa líquida: los biocombustibles líquidos como el etanol obtenido mediante fermentación alcohólica, el metanol de biomasa lignocelulósicas como la madera, o el más conocido, el biodiésel, obtenido a partir de aceites vegetales como el de girasol o el de colza, o incluso aceites vegetales usados, son empleados para el transporte y maquinaria que emplea combustibles líquidos. No sólo son neutros respecto a las emisiones de CO₂, sino que son menos contaminantes que los combustibles líquidos derivados del petróleo.

3.3.2.3 Biomasa gaseosa: se origina como resultado de un proceso natural o artificial a partir de la biomasa natural, a través de un proceso microbiológico como la fermentación anaerobia para la obtención de metano, o de un proceso termoquímico como la gasificación. En el proceso microbiológico no es necesario el aporte de oxígeno, son las bacterias anaerobias las que transforman el carbono en metano (CH₄) y CO₂. En la conversión termoquímica la biomasa se somete a un aporte de oxígeno menor al estequiométrico, donde el carbono se transforma en un gas combustible formado por CO, H₂ y algo de CH₄ (Castells, 2012).

3.3.3 Aplicaciones de las biomasa.

La existencia de diferentes tipos de biomasa y los métodos de transformación de las mismas permiten utilizarlas como combustibles para la producción de energía térmica y eléctrica, o como materia prima para la producción de biocombustibles líquidos y gaseosos (López, 2013).

Producción de energía térmica. Este tipo de energía se obtiene principalmente de la combustión directa de residuos forestales, agrícolas, de industrias transformadoras de la madera y algunos agroalimentarios (orujillo de aceituna, orujo de lavado de uva, cáscara de almendra, etc.). En este proceso se genera calor para su uso doméstico e industrial.

Producción de energía eléctrica. Este tipo de energía se obtiene por la combustión principalmente de diferentes residuos como los utilizados para la producción de energía térmica, además de los cultivos energéticos y del biogás procedente de la digestión anaerobia de algunos residuos.

Producción de biocombustibles líquidos. La Producción de biocombustibles líquidos que suplan a lo derivados del petróleo (gasolina y diésel) son una opción muy ventajosa en cuanto al empleo de energía renovables y reducción de problemas medioambientales. Existen dos tipos de biocombustibles líquidos: los bioalcoholes y el bioetanol) que se obtiene a partir de la fermentación de levaduras de materiales azucarados como caña de azúcar, remolacha, maíz, etc. y los biogasòleos (biodiesel) que se obtienen del proceso de transesterificación de materiales oleaginosos como girasol, colza, etc. O bien de grasas animales.

Producción de biocombustibles gaseosos. Producción de biocombustibles gaseosos a partir de procesos biológicos anaerobios es una opción que presenta muchos beneficios. Este gas obtenido está formado principalmente por metano, aunque tiene bajo poder calorífico puede utilizarse en las propias instalaciones donde es generado para producir electricidad y calor. La gasificación también conlleva a la producción de un gas combustible rico en hidrógeno y sobre todo en carbono (López, 2013).

3.4 Caracterización del Carbón

Es una roca sedimentaria orgánica, compuesta de carbono amorfo acompañado de hidrocarburos, compuestos orgánicos de naturaleza compleja (glúcidos como la celulosa y lignina), proteínas vegetales y materia inorgánica, de coloración que va de café a negro y peso específico de 1.0 a 1.8 gr/cm³ (Ministerio de Minas y Energía, 2012).

Su formación es el resultado de la condensación gradual de la materia de plantas parcialmente descompuestas a lo largo de millones de años. Las plantas al descomponerse forman una capa llamada turba. Hay tres tipos básicos de carbón (Universidad Politécnica de Sevilla, s,f 2004):

Lignito: Se forma una vez comprimida la turba. Es el carbón de menor valor calórico, porque se formó en épocas más recientes y contiene menos carbón (30%) y más agua. Es una sustancia parda y desmenuzable en la que se pueden reconocer algunas estructuras vegetales.

Hulla: Se origina por la compresión del lignito. Tiene un importante poder calorífico, se utiliza en las plantas de producción de energía. Es dura y quebradiza, de color negro. La concentración de carbono está entre el 75 y el 80%.

Antracita: procede de la transformación de la hulla. Es el mejor de los carbones, muy poco contaminante y de alto poder calorífico. Arde con dificultad, pero desprende mucho calor y poco humo. Es negro, brillante y muy duro. Tiene una concentración de hasta el 95% de carbono.

Con el término genérico de carbón se conoce a los compuestos que tienen en su composición al elemento carbono (C), ordenado regularmente. Los átomos situados en la parte exterior de la estructura cristalina disponen de fuerzas de atracción libre, lo que les permite atraer compuestos existentes en su inmediato alrededor (Universidad Politécnica de Sevilla, s,f 2004).

3.4.1 Propiedades Físicas del Carbón (Baez, s,f 2004).

3.4.1.1 Estructura. Desde el punto de vista de la estructura química, un carbón se compone de Cúmulos de anillos de compuestos aromáticos e hidro-aromáticos con mayor o menor grado de fusión entre ellos dependiendo de su categoría.

En las terminaciones de estas unidades básicas se encuentran a veces grupos funcionales

sustituyentes de átomos de hidrógeno. Los más comunes son el carboxílico, el carbonilo, el fenólico, el etérico y el metoxy. A su vez estos cúmulos se unen entre sí por enlaces metilénicos, etéricos o tioetéricos.

Dada la extrema heterogeneidad del carbón no puede hablarse de una “macromolécula” típica. Dependiendo de la categoría, los investigadores han propuesto algunas estructuras. Al aumentar el rango, el grado de compactación aumenta y los grupos funcionales disminuyen al igual que el oxígeno.

3.4.1.2 Porosidad. El carbón es un material altamente poroso como consecuencia de la falta de alineamiento de las unidades básicas que lo conforman. La porosidad es de gran importancia para conocer el comportamiento del carbón en los procesos de minería (explotación, liberación de metano), preparación (la densidad es función de la porosidad) y también en su utilización donde los fenómenos difusionales en el interior de la partícula pueden ser fundamentales para la cinética de las reacciones involucradas.

Todos los carbones presentan porosidad y esta depende del rango, los carbones ligníticos poseen aproximadamente un 50% volumen de poros y los carbones bituminosos medios en volátiles sólo un 3% volumen. Los poros generalmente están llenos de agua (humedad de lecho) cuando el carbón esta “in situ”. Cuando el carbón este seco o parcialmente seco los poros se vacían, pero se pueden llenar con la atmósfera del medio. Por este motivo, carbones de bajo rango se pueden contraer y su porosidad se reduce cuando el carbón se seca. Cuando este carbón nuevamente se humedece, recobra algo de la porosidad perdida. Este fenómeno es una histéresis de humedad.

La porosidad se puede estimar a partir de la humedad de equilibrio: La combustión heterogénea del carbón es una reacción que ocurre en la superficie por lo que el conocimiento del área disponible es muy importante.

3.4.1.3 Dureza. La dureza es una propiedad de cuerpos sólidos homogéneos y determina la resistencia del cuerpo a la penetración de otro o la resistencia al desbastado.

Debido a que los carbones son heterogéneos, no existe un método para medir la dureza de una muestra de un manto de carbón.

3.4.1.4 Granulometría. Es la distribución por tamaño de las partículas del carbón crudo, depende de los procesos de trituración y manipulación mineros, así como de la dureza del carbón. Para determinar las técnicas de preparación y beneficio del carbón, la granulometría es un dato muy necesario. La distribución del tamaño de partículas se basa por el método del tamizado (Baez,s,f 2004).

3.4.2 Propiedades Químicas

3.4.2.1 Humedad: se encuentra localizada en el interior de los poros y capilares, retenidas por la fuerza de absorción y condensación capilar, se considera una característica básica del carbón relacionada con el rango (o grado de carbonificación) a través de proporcionalidad inversa: Para antracita 1-3%, para carbones Bituminoso 1-4% para carbones subbituminosos 1-6%, para Lignitos > 45%, para turba > 60% (Romero, L,2015).

3.4.2.2 Ceniza. Las cenizas del carbón se ablandan y funden cuando son calentadas bajo condiciones prescritas. Las cenizas son sometidas a temperatura por encima de 850°C, la fusibilidad de la ceniza depende de su composición química.

3.4.2.3 Índice de hinchamiento. Un alto índice de hinchamiento sugiere que durante la combustión la partícula de carbón se expandiera para formar residuos porosos de poco peso, que serán emitidos con los gases de combustión y podrán contribuir, de esta forma a unos elevados niveles de inquemados en las cenizas volantes.

La determinación del índice de hinchamiento consiste en la combustión en unas condiciones preestablecidas de una muestra de carbón en un recipiente característicos. (Véase figura 4).

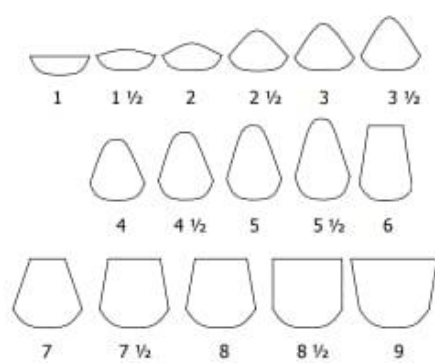


Figura 4 Perfiles patrón y los corrientes números de índice de hinchamiento

Fuente: Manual sobre métodos de muestreo, preparación y análisis de carbón y coque.

Autor: Luz Estela Romero Ramírez, 2015

3.4.2.4 Materia volátil. La materia volátil son desprendimientos gaseosos de la materia orgánica del carbón cuando se calienta en un medio libre de aire, también se desprenden líquidos, estos desprendimientos aumentan de temperatura, la materia volátil es uno de los parámetros más importantes para la clasificación de carbones y subproductos en los procesos de carbonificación.

3.4.3 Propiedades Térmicas (Textos Científicos, 2004).

3.4.3.1 Conductibilidad Térmica. Es la capacidad que presenta el carbón para conducir el calor. Tiene importancia sobre todo en los hornos de coquización, ya que el hecho de que el calor aplicado se transmita lo más rápidamente posible permitiendo que el proceso tenga mayor rendimiento.

3.4.3.2 Calor específico. Es la cantidad de calor necesario para elevar la temperatura de 1g de carbón 1°C, es importante en el proceso de coquización.

3.4.3.3 Dilatación. Es el aumento de volumen por efecto del incremento de temperatura. Bangham y Franklin han hecho estudios sobre la dilatación de los carbones. Concluyen que la antracita presenta importantes variaciones en el volumen con cambios de temperatura, pero dependiendo también de la orientación (anisotropía). En cambio, en cuanto a las hullas, la dilatación va a depender más de la temperatura de experimentación. (Textos Científicos, 2004).

3.5 Caracterización de las Biomásas

La biomasa se caracteriza por tener un bajo contenido de carbono, menor al 50%, un alto contenido de oxígeno, mayor al 44% y un alto contenido de materia volátil, superior al 85%, formada por hidrocarburos (C_nH_m), dióxido de carbono (CO_2) e hidrógeno (H_2), aunque también suele contener hollín y vapor de agua. Además, en muchos casos presenta un bajo contenido de cenizas y casi nulo contenido de azufre (Cutimbo, M, 2017).

Al momento de seleccionar una tecnología para su aprovechamiento energético es importante conocer la composición de la biomasa mediante la determinación, de los siguientes parámetros según Cutimbo (2017):

Características físicas: densidad aparente, densidad real y humedad.

Análisis elemental: porcentaje en masa de oxígeno, carbono, hidrógeno, azufre y nitrógeno.

Análisis próximo: contenido de carbono fijo, poder calorífico, materia volátil y ceniza.

Composición: contenidos de lignina, celulosa, hemicelulosa, proteínas, azúcares, grasas y aceites.

3.5.1 Propiedades Físicas (De Lucas, Del Peso, Rodríguez & Prieto, 2012).

3.5.1.1 Contenido de humedad. También denominada humedad relativa, es la relación de la masa de agua contenida por kilogramo de materia seca. La humedad de la biomasa puede medirse en base seca (h) o en base húmeda (H).

Cuanto menor sea este contenido mejor será el valor calorífico de esa biomasa y su proceso de combustión, ya que cuando se quema, primero hay que evaporar el agua antes de que el calor esté disponible. La mayoría de los procesos de conversión energética requieren valores de humedad relativa inferiores al 30%. Con valores superiores se hace necesaria la implementación de operaciones de acondicionamiento y secado previas al proceso de conversión de energía.

3.5.1.2 Porcentaje en cenizas. Indica la cantidad de materia sólida no combustible por kilogramo de materia prima. Conviene que su porcentaje en relación a la materia seca sea el menor posible.

3.5.1.3 Poder calorífico. Determina la energía disponible en la biomasa, siendo el contenido calórico por unidad de masa, se expresa como la cantidad de energía por unidad física (ej. Joule

por kilogramo). Es la energía que se libera en forma de calor cuando la biomasa se quema completamente, por consiguiente, el poder calorífico superior (PCS) es aquel calor que verdaderamente se produce en la reacción de combustión y el inferior (PCI) el realmente aprovechable, producido sin utilizar la energía de la condensación del agua y de otros procesos.

3.5.1.4 Densidad aparente. Se define como el peso por unidad de volumen del material en el estado físico que presenta. Los combustibles que presentan una densidad aparente elevada favorecen la relación de energía por unidad de volumen, ya que se requieren menores tamaños de los equipos y se aumenta el tiempo que transcurre entre cargas del equipo. Por el contrario, las materias primas de baja densidad aparente necesitan un mayor volumen de almacenamiento y transporte. (De Lucas, Del Peso, Rodríguez & Prieto, 2012).

3.5.2 Propiedades Químicas (De Lucas, Del Peso, Rodríguez & Prieto, 2012).

Los diferentes tipos de biomasa están formados por una parte orgánica, una inorgánica y agua. Durante la combustión, se quema la parte orgánica, la inorgánica influye en el proceso de combustión y forma la ceniza o residuo sólido.

La composición química de la biomasa original se puede conocer realizando análisis de los elementos más importantes, como carbono (C), hidrógeno (H), nitrógeno (N), azufre (S), y en algunos casos cloro (Cl). También contiene oxígeno (O), pero este elemento no se determina directamente, sino que se calcula a partir de la diferencia entre el peso total y la suma del resto de elementos más las cenizas.

3.5.3 Propiedades Térmicas

Termogravimétrico (TGA por sus siglas en inglés Thermogravimetric Analysis), proporciona una evaluación rápida del combustible mediante la determinación del tiempo de combustión total,

de las temperaturas de inicio, finalización y máxima combustión (Navarta, Ojeda & Rojas, 2008; Dugan & Moran, 1970), con el fin de estudiar la reactividad de los materiales en la combustión.

3.5.4 Selección de Materiales

Aunque en la naturaleza existen muchas biomásas se seleccionaron las más asequibles del sector teniendo en cuenta la procedencia, para el estudio se tomaron tres biomásas como es la cascarilla de arroz, cisco de café y aserrín.

Cascarilla de arroz:

La cascarilla de arroz es un subproducto (residuo), del proceso del trillado del paddy verde para la obtención del arroz blanco. Por cada 5 toneladas paddy que se muele se genera una tonelada de cascarilla (Espinal & Covaleda, 2007).

La planta de arroz, científicamente denominada *Orizac sativa* y perteneciente a la familia de las gramíneas, está constituida por cuatro componentes principales: a) el germen, la parte más rica en nutrientes, ácidos grasos, aminoácidos y enzimas, que se constituye en la parte germinal que da lugar al crecimiento del grano; b) el endospermo, que representa alrededor del 70% del volumen del grano y constituye al final del proceso el producto denominado arroz blanco; c) la cutícula o polvillo, el cual alcanza un 6.8% en volumen en el grano de arroz, utilizado como alimento para animales por su alto contenido de grasas y d) la cáscara o pajilla, que constituye aproximadamente 20% en peso del grano y que es separado en el proceso de pilado formándose verdaderas montañas de cascarilla al costado de los molinos, lo que ocasiona problemas de espacio por la acumulación de este desecho .

Normalmente, la cascarilla se incinera para reducir su volumen generando humos contaminantes. Como combustible genera calor, debido a su valor calórico aproximadamente 16720 kJ/kg) y la ceniza resultante contiene un porcentaje en sílice superior al 90%, lo cual la hace una potencial fuente de sílice. Las principales impurezas que contiene esta sílice son: calcio, potasio, magnesio, manganeso y como secundarias aluminio, hierro (10-20ppm), boro y fosforo. (1-40 ppm).

Es una fibra corta que recubre naturalmente el grano para protegerlo del ambiente. Su longitud varía entre 5 y 11 mm según la especie considerada, es de estructura ondulada y apariencia superficial irregular. Tiene propiedades altamente abrasivas, 6 en la escala Mohs en estado natural (Sierra, 2009).

Cisco de café:

La cascarilla o cisco de café es una envoltura cartilaginosa de color blanco amarillento de aproximadamente 100 micrómetros de espesor y que corresponde al endocarpio (pergamino) del fruto, la semilla se encuentra en una forma suelta dentro de esta. Se extrae mediante el proceso de trillado donde ocurre una separación, a continuación, se presentan las características físicas y químicas. El cisco representa el 4,2 % en peso del fruto fresco y se ha convertido en un recurso energético potencial debido a su poder calorífico (Cenicafe, 2011). Este subproducto reporta una capacidad calórica de 17.90 MJ/Kg (Montilla, 2006). Por el alto contenido de celulosa y su poder calorífico la cascarilla de café se utiliza como material de combustión.

Aserrín:

El aserrín es el conjunto de partículas o polvillo que se desprende de la madera cuando ésta es aserrada; también contiene minúsculas partículas de madera producidas durante el proceso y manejo de la misma, paneles contrachapados y/o aglomerados. Además del polvo, en el proceso de aserrado se genera la viruta, que es un fragmento de material residual con forma de lámina curvada o espiral (Reyes, 2013).

La composición química y física determinan el tipo de combustible o subproducto energético que se puede generar, específicamente las características físicas influyen en el tratamiento previo que sea necesario aplicar. Por esto se necesita caracterizar estas biomásas en cuanto a contenido de humedad, volátiles, carbono fijo, cenizas y granulometría. (Serret, Giralt & Quintero, 2016).

3.5.5 Toma de Muestras

3.5.5.1 Toma de muestra biomasa. Las biomásas fueron suministradas por industrias del sector como la empresa Arrocería Gelvez, Café Galaviz y Maderas Márquez. El peso de las biomásas suministrado oscila entre 30 - 60 kilogramos. (Véase en las figuras 5, 6 y 7), de las cuales se tomaron 20 kilogramos, se homogenizaron en una lona y se cuartearon hasta obtener las muestras de análisis de 10 kg, dejando una muestra como testigo de cada biomasa, todas las muestras se empacaron en bolsas plásticas y se identificaron con etiquetas autoadhesivas (Véase en la figura 8) además se separaron las muestras de análisis para enviar a cada laboratorio con pesos de 0,2 a 1,2 kg.



Figura 5 Cisco de café

Fuente: Ramirez & Ortiz, 2019.



Figura 6 Cascarilla de arroz

Fuente: Ramirez & Ortiz, 2019.



Figura 7 Aserrín

Fuente: Ramirez & Ortiz, 2019.



Figura 8 Muestras representativas de las biomazas

Fuente: Ramirez & Ortiz, 2019.

3.5.5.2 Toma de muestra de carbón. Las labores de muestreo se realizaron manualmente con una pala, el sitio de muestreo fue ubicado en el punto de descarga de la banda transportadora que evacua el material de la tolva de alimentación donde se carga el carbón mediante cargador frontal, allí se descarga sobre una malla 20*20 mm con la cual garantiza que no ingrese sobre tamaño al proceso, quedando almacenado en una tolva que distribuye el material en un elevador de cangilones y lo traslada a la parte superior de la estructura de la hornalla, descargando cada cangilón en la tolva de alimentación del tornillo sin fin, el cual se acciona automáticamente cuando el sistema del combustor del lecho fluidizado requiere combustible que genera un volumen de aire caliente que se lleva hasta parte superior del atomizador el cual choca en contracorriente con la barbotina atomizada mediante un sistema de boquillas para la conformación de la pasta cerámica (véase en las figuras 9 y 10).



Figura 9 Sistema combustor lecho fluidizado

Fuente: Ramirez & Ortiz, 2019.



Figura 10 Tolva de alimentación del sistema combustor lecho fluidizado

Fuente: Ramirez & Ortiz, 2019.

Las muestras fueron recolectadas en bolsas plásticas, posteriormente, se homogenizaron en una lona y se cuartearon hasta obtener una muestra representativa de análisis de 10 kg, dejando una muestra como testigo, la cual se empaco e identifico con etiquetas autoadhesivas. (Véase en la figura 11).

Las muestras fueron tomadas manualmente con pala tomando incrementos a todo lo ancho de la banda transportadora y con poco flujo de carbón, los incrementos fueron tomados a intervalos iguales de tiempo de una hora durante la jornada de 7 am a 12 m y de 2:00 pm a 6:00 pm, dando un total de ocho muestras diarias, los incrementos fueron recolectados en bolsas plásticas cuyos pesos oscilan entre 4.0 a 4.3 Kg cada una y posteriormente se rotularon. (Véase en las figuras 12 y 13).



Figura 11 Muestras representativas para realizar los análisis pertinentes

Fuente: Ramirez & Ortiz, 2019.



Figura 12 Toma de muestra en la descarga de la banda transportadora

Fuente: Ramirez & Ortiz, 2019.



Figura 13 Toma de muestra empacada y rotulada

Fuente: Ramirez & Ortiz, 2019.

3.6. Determinación de parámetros:

La determinación de los parámetros se realizó en el laboratorio de la planta de procesos cerámicos:

3.6.1. Porcentaje de humedad (%H):

Es la relación en peso de la cantidad de agua intersticial presente en la roca de forma libre (sin considerar aquella que hace parte de la composición química y estructural de los minerales) respecto al total. Este parámetro puede ser variable ya que depende de las circunstancias con las que llega la muestra al laboratorio. Para el presente análisis, se determinó en condiciones alteradas que son las muestras de explotación ya que son expuestas a agentes atmosféricos como el sol o la lluvia.

Para la determinación de la humedad base seca se utilizaron 4 - 5 g de cada muestra, dispuestos en el platillo portamuestra de la balanza METTLER TOLEDO HB-43, registrando el proceso de secado mediante el software Labx Direct Moisture 2.2 (Véase en la figura 14) que permite ver los resultados en tiempo real, creando un reporte de datos en un formato Excel. La balanza puede alcanzar una temperatura máxima de 170°C durante el tiempo necesario para que la muestra presente peso constante, el cual puede variar dependiendo del tipo de mineral. En la figura 15 se observan las curvas de secado de las muestras representativas, en la cual RP 1 tiene una humedad de 8.79% con un tiempo de secado de 7 min 07s, la RP 2 tiene una humedad de 9.49% con un tiempo de secado de 5 min y la RP 3 tiene una humedad de 9.29% con un tiempo de secado de 6 min 49 s, los resultados de las humedades obtenidos para cada muestra en dicho software se encuentra en el anexo 1.



Figura 14 Balanza (METTLER TOLEDO HB-43), configurada al computador con el software (Labx Direct Moisture 2.2)

Fuente: Ramírez & Ortiz, 2019.

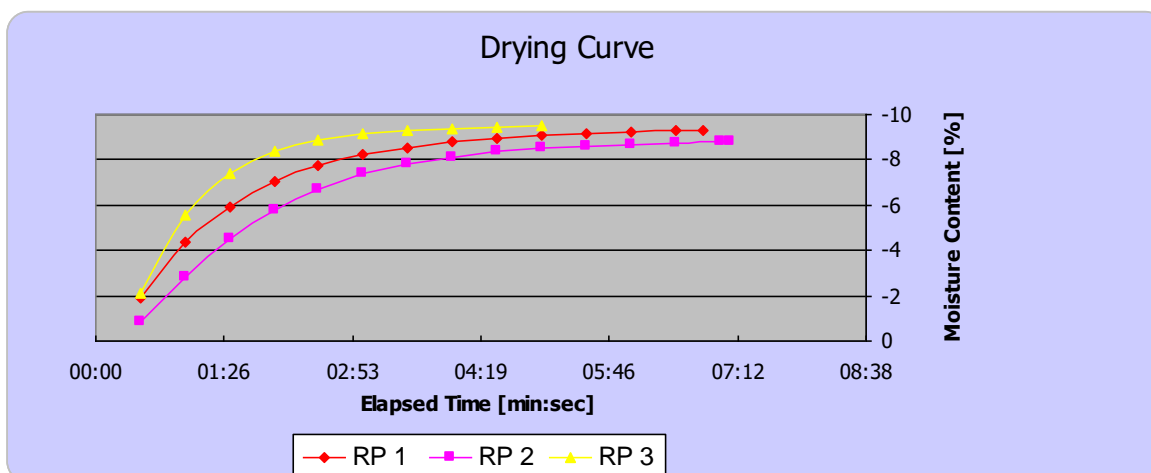


Figura 15 Humedades de muestras representativas

Rp1: Representativa 1, Rp2: Representativa 2, Rp3: Representativa 3

Fuente: Ramírez & Ortiz, 2019.

3.6.2 Distribución granulométrica.

La prueba se realizó pesando 500 gramos de muestra, llevando al vibro tamiz (Véase en la figura 16) usando la siguiente serie de tamices ASTM: 5/8, 1/2, 5/16, 1/4, 5, 10, 20, 30, y fondo colector (ver tabla 1), este proceso se realizó por 5 minutos, una vez pasado este tiempo se procedió a pesar el retenido de cada tamiz, el resultado se expresa en porcentaje y se puede observar en el anexo 2.



Figura 16 Equipo de Tamizado

Fuente: Ramírez & Ortiz, 2019.

Tabla 1 Distribución granulométrica

ID MUESTRA	PESO	5/8	1/2	5/16	1/4	5	10	20	30	FONDO
RP1	500g	52	70,3	94	72,2	55,1	55	47,7	20,3	33
RP2	500g	53,7	73,6	88,3	73,2	70,3	60,6	42,4	19,7	18
RP3	500g	53,6	87,9	81.1	60,6	74	57,9	39,2	23,2	22,2

3.6.3. Preparación de las muestras representativas:

Después de haber realizado la humedad y la granulometría se determinó el número de muestras, teniendo en cuenta el peso y la humedad de cada una de ellas, se determina de la cantidad de cada muestra parcial requerida para conformar de manera proporcional la muestra representativa diaria (ver anexo 2, hoja representativa).

Una vez pesada cada muestra se procede a homogenizar con ayuda de una lona y posteriormente se cuartea, dejando una muestra de testigo y la otra como representativa diaria para realizar los análisis pertinentes, la cual se empaca en una bolsa plástica y se rotula con etiqueta autoadhesiva. (Véase en las figuras 17, 18 y 19).



Figura 17 Homogenización de la muestra

Fuente: Ramírez & Ortiz, 2019.



Figura 18 cuarteo de la muestra

Fuente: Ramírez & Ortiz, 2019.



Figura 19 Empacada y rotulada la muestra testigo y representativa

Fuente: Ramírez & Ortiz, 2019.

La toma de muestras de carbón se realizó por un periodo de 16 días, preparando muestras representativas por día y cada 4 días, de cada muestra representativa final se le tomo humedad y granulometría, además se cuartearon para obtener 3.200 Kg. de muestra para ser enviada a los laboratorios para los análisis físicos y químicos (véase en la figura 20).



Figura 20 Muestra de análisis químicos

Fuente: Ramirez & Ortiz, 2019.

4. Parte experimental

4.1 Preparación de la muestra

El objetivo de la preparación de la muestra para los análisis es llevar la muestra bruta, al estado de granulación, peso y humedad exigidos para determinar las propiedades físicas y químicas del carbón representado.

La preparación de la muestra se realizó mediante las siguientes operaciones: homogenización y división (cuarteo) de la muestra bruta, adicionalmente pulverización, homogenización y cuarteo para obtener la muestra de análisis de 100 gr.

4.1.1. Equipos utilizados para la preparación de la muestra de análisis.

4.1.1.1. Balanza digital. Es un tipo de báscula diseñada para ofrecer resultados exactos, dentro del rango de submiligramos, proporcionan una forma exacta, rápida y sencilla de determinar el peso de elementos como las partículas en suspensión. Las balanzas electrónicas de precisión ofrecen una amplia gama de capacidades de pesaje, con capacidades máximas de hasta 64 Kg. Permiten una legibilidad en el rango de 1 mg (0,001 g) a 1 g o de 0 a 3 decimales. Las balanzas de laboratorio de alta precisión pueden extender su exactitud a 4 decimales, en la pantalla de la balanza de precisión se usan incrementos de 0,0001g (0,1 mg). (METTLER TOLEDO 2006). La balanza digital empleada para el pesaje de las muestras de laboratorio del proyecto tiene una capacidad máxima 16 kg y sensibilidad de 0,1 gr. (Véase figura 21).



Figura 21 Balanza digital

Fuente: Ramírez & Ortiz, 2019

4.1.1.2. El cuarteador: es un instrumento utilizado para separar muestras, en el cual la muestra alimentada cae a través de varios espacios (o agujeros) paralelos, de ancho igual o uniforme y se divide en dos partes de aproximadamente el mismo peso, una de las cuales se retiene y la otra se descarta. (Véase figura 22)

Cuarteador (Minería) recuperado de <https://glosarios.servidor-alicante.com>



Figura 22 Cuarteador

Fuente: Ramirez & Ortiz, 2019

4.1.1.3. Pulverizador o Molino de martillos: para que la reducción final de la muestra de laboratorio llegue al tamaño de 250 micras, se pasa por el pulverizador o molino de martillo, completamente encerrado para evitar pérdidas de polvo o de humedad (Véase figura 23 y 24).



Figura 23 Pulverizador o Molino de martillos UFPS

Fuente: Ramirez & Ortiz, 2019



Figura 24 Molino de martillos de la planta de procesos cerámicos

Fuente: Ramírez & Ortiz, 2019.

4.1.1.4. Tamizadora: Es un equipo que separa los sólidos formados por partículas de tamaños diferentes. Y consiste en pasar una mezcla de partículas de diferentes tamaños por un tamiz, cuyo funcionamiento imparte una acción uniforme de tamizado para un gran rango de dimensiones de tamices. La tamizadora puede manejar hasta 10 tamices de altura completa de 8", 12 tamices de altura completa de 5" y 16 tamices de altura completa de 3" y 18 tamices de media altura de 8". (Véase figura 25 y 26).

Recuperado de: Bibliografía. UTEST, equipo para ensayo de materiales

Para la clasificación de tamaños se empleó la serie de tamices TYLER, con tapa y fondo de las siguientes dimensiones:

No	Tamaño
4	4,75mm
8	2,36mm
20	850 μ m
60	250 μ m



Figura 25 Tamizador laboratorio de carbones UFPS

Fuente: Ramírez & Ortiz, 2019.



Figura 26 Tamizadora de la planta de procesos cerámicos

Fuente: Ramírez & Ortiz, 2019.

4.1.1.5. Homogeneizador. Aparato mecánico que se usa para mezclar las muestras de análisis, tiene catorce posiciones para recipientes con una capacidad aproximada de 200 gr; su giro es de 30 revoluciones / minuto. (Véase figura 27).



Figura 27 Homogeneizador

Fuente: Ramírez & Ortiz, 2019.

4.1.1.5. Bandejas. Son recipientes rectangulares de un material no corrosivo de diferentes tamaños para que la muestra quede espaciada a una altura no mayor a 25mm.

4.1.2. Procedimiento de reducción y división manual

La preparación de las muestras de carbón consiste en pasar la muestra bruta o inicial a través de la malla ASTM N° 8, luego se pasa por el cuarteador para dividirla y obtener dos muestras iguales, una de las muestras se guarda como testigo y la otra se pasa por el equipo pulverizador o

molino de martillos para reducir el tamaño de la muestra a malla ASTM N° 60 (0,24mm), se divide la submuestra usando un cuarteador pequeño para reducir la cantidad de muestra dejando una como testigo y la otra posteriormente se mezcla en el homogeneizador. La preparación de las muestras de carbón se realizó en el laboratorio de carbones de la Universidad Francisco de Paula Santander.

Las biomásas se sometieron a reducción de tamaño en el molino de martillos del laboratorio de materias primas de la planta de procesos cerámicos, una vez homogenizada la muestra se empaco y rotulo para ser enviadas para sus análisis.

4.2. Método de análisis.

Con el fin de conocer y seleccionar las biomásas con mayor potencial para la combustión, se caracterizaron mediante análisis químico, próximo completo, termogravimétrico y Calorimetría diferencial de barrido y para el carbón se llevaron a cabo los análisis químicos, petrográfico, próximos completos, últimos, índice de hinchamiento libre, fusibilidad de cenizas en atmósfera oxidante y en atmósfera reductora, termogravimétricos y Calorimetría diferencial de barrido. (Ver Anexos 3-5).

4.2.1. Análisis próximos

4.2.1.1. Determinación de la humedad total de muestra de carbón y coque según norma ASTM de 3302/D 3302M-12

Es la cantidad de humedad superficial e inherente en el carbón en el momento del análisis. Este método de ensayo cubre la medición de la humedad total en el carbón tal y como existe en el sitio, en el momento y bajo las condiciones según las cuales muestrean. La humedad total es la suma de la humedad superficial y la humedad residual.

4.2.1.2. Humedad superficial o libre

Es la pérdida de peso del carbón hasta alcanzar el equilibrio aproximado con la atmósfera del lugar donde se realiza la preparación, se adhiere mecánicamente al carbón dependiendo de las operaciones que sufre y de las condiciones a las cuales se exponen. Esta agua conserva sus propiedades físicas y químicas habituales, después de ser eliminada se dice que el carbón está en estado “secado al aire”.

4.2.1.3. Humedad residual

Es aquella que queda en la muestra de carbón después que se han determinado las pérdidas de humedad por secado al aire, (norma ASTM D-3173). Es el agua localizada en el interior de los poros y capilares, retenida por fuerza de adsorción y condensación capilar, es insensible a las condiciones atmosféricas, se considera una característica básica del carbón relacionada con el

rango, se dice que después de su remoción el carbón está en estado “seco”. La humedad residual depende de las condiciones atmosféricas del laboratorio, (temperatura, presión, humedad relativa) por tanto, los resultados no son iguales en los laboratorios, especialmente en las muestras de carbón con un alto contenido de humedad de equilibrio. Si se desea comparar resultados de muestras iguales obtenidos en diferentes laboratorios se debe pasar los valores a base como se recibió o a base seca.

4.2.1.4. Determinación de la ceniza según Norma ASTM 3174-12

La ceniza se determina pesando el residuo remanente después del quemado el carbón o coque, bajo condiciones rigurosamente controladas de peso de muestra, temperatura, tiempo atmosfera y especificaciones de equipos.

4.2.1.5. Determinación de materia volátil según norma ASTM D-3175-11

Este método determina el porcentaje de productos gaseosos excluyendo la humedad, los cuales son liberados por la muestra de análisis en las condiciones específicas del ensayo. La materia volátil se determina estableciendo la pérdida de peso al calentar el carbón bajo condiciones rígidamente controladas, para su cálculo la pérdida en peso que se obtiene es corregida por la humedad residual, representa el contenido de materia volátil.

4.2.1.6. Determinación de azufre según norma ASTM D 4239-14 E02

Este método proporciona lo necesario para la separación del azufre asociado al carbón en las formas más prevalentes, que son: pirítico, sulfato y orgánico. Las separaciones se realizan

mediante métodos de digestión reconocidas seguidos por técnicas aceptadas para la medida. Los resultados obtenidos por el método sirven a diferentes intereses, que incluyen la evaluación de las operaciones diseñadas para la preparación del carbón y procesos para reducir los niveles de azufre del carbón.

4.2.1.7. Determinación de carbono fijo según norma ASTM D 3172-13

El carbono fijo es la parte que no es volátil y quema en estado sólido, se encuentra en el residuo que queda luego de determinada la materia volátil, su valor calculado se obtiene de sustraer de cien la suma de los porcentajes de humedad, cenizas y materia volátil, todos los cuales deben estar en la misma base de referencia.

Recuperado de: **Carbono fijo (Minería)** © <https://glosarios.servidor-alicante.com>

4.2.1.8. Determinación de índice de hinchamiento según norma ASTM D 720/D720M-15E01

Es un ensayo a pequeña escala en el laboratorio, para obtener información sobre las propiedades de hinchamiento libre del carbón; de acuerdo a los resultados indica si el carbón tiene características aglutinantes cuando se emplea como combustible. Un alto índice de hinchamiento sugiere que durante la combustión la partícula de carbón se expandirá para formar residuos porosos de poco peso, que serán emitidos por gases de combustión y podrán contribuir, de esta forma, a unos elevados niveles de inquemados en las cenizas volantes.

4.2.1.9. Fusibilidad de cenizas según norma ASTM 1857/1857M-04(2010) (A)

Describe el ensayo por el cual las cenizas del carbón, se ablandan y funden cuando son calentadas bajo condiciones prescritas. La fusibilidad característica de la ceniza de diferentes carbones varía ampliamente y depende de su composición química. Las cenizas son sometidas a temperaturas superiores a los 800°C, pasan del estado sólido al estado líquido, por una sucesión de estados de intermedios.

4.2.2. Análisis últimos

4.2.2.1. Determinación de carbono e hidrogeno en muestra de carbón y coque según norma ASTM D 5373-16 Método A (A)

La determinación de carbono e hidrógeno se hace quemando una cantidad pesada de muestra en un sistema cerrado y reteniendo los productos de combustión en un tren de absorción después de la oxidación completa y de la purificación de las sustancias que puede inferir. Este método se determina en una operación, que da los porcentajes totales de carbono e hidrogeno del carbón, también incluye el carbono presente en los carbonatos minerales y el hidrógeno presente en la unidad libre de las muestras y del agua de hidratación de los silicatos.

4.2.2.2. Determinación de nitrógeno en muestra de carbón y coque según norma ASTM D 5373-16 Método A (A)

En este procedimiento el nitrógeno se convierte en sales de amonio por medio de una digestión destructiva de la muestra con calor y utilizando una muestra catalizadora de K_2SO_4 , $HgSO_4$, y selenio en proporción.

Después de la digestión, la sal de amonio es descompuesta con solución alcalina caliente, y el amoniaco desprendido es recuperado por destilación y determinado finalmente por titulación alcalimetría o acidimetría.

5. Resultados y análisis del carbón

5.1. Reporte de resultados de análisis próximos completos del carbón de consumo en base como se recibe.

Los resultados de los análisis próximos completos (ver la tabla 2) muestran bajo contenido de humedad, menores al 10%, se considera ventaja ya que el poder calorífico disminuye con la humedad y en consecuencia se debe hacer un secado anterior a la combustión. Las cenizas influyen fuertemente en el poder calorífico del carbón ya que son sustancias inorgánicas no combustibles, pero se consideran que el porcentaje de ceniza menor al 10% no afectan considerablemente el poder calorífico del carbón térmico sin embargo la muestras M3 presenta un contenido de cenizas superior al 10% que alteraría la calidad de la combustión.

Se observa que las muestras son ricas en materias volátiles que reaccionan termoquímicamente a menores temperaturas, lo cual favorece los procesos de gasificación o combustión (Smoliński

A. 2011). De manera general, puede decirse que las muestras de carbón muestran un poder calorífico alto cumpliendo con lo requerido en la planta procesos cerámicos.

Tabla 2 Análisis próximo completo ASTM COAL H D3302, C D

ANÁLISIS PRÓXIMO COMPLETO ASTM COAL H D3302, C D								
Análisis	Método	M1	M2	M3	RP	Parámetro de Control		
						Límite Inferior	Objetivo	Límite Superior
Humedad Total, % en peso	ASTM D3302/D3302M-15	8.8	8	8.12	8,16	5,79	7,27	10,00
Ceniza, % en peso	ASTM D 3174-12	9.1	9.01	11.08	8,99	8,81	9,71	10,61
Materia Volátil, % en peso	ASTM D 3175-11	43.82	44.17	42.76	42,41	40,44	43,07	45,70
Carbono Fijo (por diferencia), % en peso	ASTM D 3172-13	38.28	38.82	38.04	40,44	37,33	39,95	42,58
Azufre, % en peso	ASTM D 4239-14 E02	1.2	1.07	1.52	1,29	0,92	1,08	1,25
Poder Calorífico Bruto (Kcal/Kg)	ASTM D5865-13	6484	6576	6410	6505	6.459,29	6.629,80	6.800,31

Fuente: Ramírez & Ortiz, 2019.

5.2. Reporte de resultados del análisis del índice libre de hinchamiento (FSI) del carbón de consumo secado al aire

En los resultados de análisis de FSI (ver tabla 3) se puede observar que es un carbón no aglomerante, según la clasificación aglomerante de índice de hinchamiento libre de (Speight, J. 2005).

ÍNDICE DE HINCHAMIENTO LIBRE	CLASIFICACIÓN
0	No aglomerante
1-2	Débilmente aglomerante
2-4	Medianamente aglomerante
> 4	Fuertemente aglomerante

Algunos carbones cuando se someten a tratamiento térmico exhiben un determinado comportamiento, atraviesan por una etapa plástica, se ablandan, hinchan y se solidifican. Este tipo de carbones se conocen como carbones aglomerantes, mientras que el resto de carbones se denominan carbones no aglomerantes (Kernot, C., 2000) El carácter aglomerante generalmente incrementa con el contenido de materia volátil alcanzando un máximo en el intervalo entre 25 % y 35 %, a partir de este punto disminuye; también incrementa con el contenido de hidrógeno y decrece con el contenido de oxígeno y de materia mineral (Speight, J. 2005).

Tabla 3 Análisis de FSI- Free Swelling Index

ANÁLISIS DE FSI- FREE SWELLING INDEX							
	Método	M1	M2	M3	Parámetro de Control		
					Limite Inferior	Objetivo	Limite Superior
Índice de Libre Hinchamiento (FSI)	ASTM D720/D720M-15E01	0.5	0	0.5	0	0.48	1,00

Fuente: Ramírez & Ortiz, 2019

5.3. Reporte de resultados de análisis de fusibilidad de cenizas en atmosfera oxidante del carbón de consumo dada en °C.

El resultado de fusibilidad de ceniza en atmosfera oxidante (ver tabla 4) es importante ya que nos muestra la temperatura de deformación inicial, ablandamiento hasta la de fluidez y se observa que la muestra 3 se encuentra cerca de cumplir las cuatro temperaturas en los parámetros de calidad establecidos para el consumo del carbón en la planta de procesos cerámicos, por tanto a temperaturas inferiores tienden presentar aglomeraciones en las escorias, obstaculizando la buena distribución del aire de combustión y disminuyendo la velocidad del desplazamiento del carbón, en las muestras M1 y M2 se obtuvieron valores por debajo del límite inferior lo cual indica que si se mantienen por largo tiempo pueden afectar el funcionamiento del equipo por ser cenizas fundentes.

Tabla 4 Análisis de fusibilidad en cenizas en atmosfera oxidante

ANÁLISIS DE FUSIBILIDAD EN CENIZAS EN ATMOSFERA OXIDANTE							
Estado	Método	M1	M2	M3	Parámetro de Control		
					Límite Inferior	Objetivo	Limite Superior
Deformación Inicial	ASTM D1857/D1857M-04(2010) (A)	1273	1294	1354	1332	1384	1436
Ablandamiento	ASTM D1857/D1857M-04(2010) (A)	1282	1304	1359	1350	1397	1445
Hemisférica	ASTM D1857/D1857M-04(2010) (A)	1293	1314	1365	1365	1407	1449
Fluidez	ASTM D1857/D1857M-04(2010) (A)	1321	1340	1374	1379	1416	1454

Fuente: Ramírez & Ortiz, 2019.

5.4. Reporte de resultados de análisis de fusibilidad de cenizas en atmosfera reductora del carbón de consumo en °C

En la tabla 5 se observa que en los resultados se encuentra en los parámetros establecidos de la planta de procesos cerámicos, más sin embargo en la parte de fluidez se encuentra por debajo del límite inferior.

Tabla 5 Análisis de fusibilidad en cenizas en atmosfera reductora

ANÁLISIS DE FUSIBILIDAD EN CENIZAS EN ATMOSFERA REDUCTORA							
Estado	Método	M1	M2	M3	Parámetro de control		
					Límite Inferior	Objetivo	Límite Superior
Deformación Inicial	ASTM D1857/D1857M-04(2010) (A)	1219	1247	1197	1192	1273	1354
Ablandamiento	ASTM D1857/D1857M-04(2010) (A)	1262	1281	1238	1237	1308	1379
Hemisférica	ASTM D1857/D1857M-04(2010) (A)	1274	1299	1280	1286	1344	1402
Fluidez	ASTM D1857/D1857M-04(2010) (A)	1315	1320	1305	1326	1377	1427

Fuente: Ramírez & Ortiz, 2019.

5.5. Reporte de resultados de análisis últimos del carbón de consumo en base como se recibe.

El análisis elemental proporciona información de los elementos C, H, N, O. Los resultados de la Tabla 6 indican alto contenido de nitrógeno (>1%) de las muestras lo cual es una desventaja para el proceso de combustión por la alta emisión de NO_x. El oxígeno es beneficioso para reducir la cantidad de aire al proceso.

Tabla 6 Análisis últimos de carbón

ANÁLISIS ÚLTIMOS				
Elemento	Método	M1	M2	M3
Carbono, % en peso	ASTM D5373-16 Método A (A)	64.2	65.1	62.5
Hidrógeno, % en peso	ASTM D5373-16 Método A (A)	5.09	5.31	5.25
Oxígeno (por diferencia) %	ASTM D5373-16 Método A (A)	10.35	10.38	10.34
Nitrógeno, % en peso	ASTM D3176-09 (by diff)	1.30	1.18	1.17

Fuente: Ramírez & Ortiz, 2019.

5.6. Reporte de resultados de análisis próximos completos de las biomásas en base como se recibe.

En los análisis próximos completos de las biomásas (ver tabla 7) se observa que el cisco de café y el aserrín tienen muy bajo contenido de cenizas mientras que la cascarilla de arroz es alta

por tanto reduce el rendimiento térmico debido a que las cenizas dificultan la transmisión de calor, bajando la temperatura de combustión y reduciendo la cantidad de calor que podría extraerse de la biomasa. El contenido de materia volátil del cisco de café es alto puede ser beneficioso en el proceso de combustión contribuyendo a incrementar la reactividad. De manera general se puede decir que las tres biomásas tienen bajo contenido de azufre (<1%) de las muestras siendo una ventaja para el proceso de combustión por la disminución en la emisión de SO_x. El poder calorífico representa la energía química almacenada en el material que es liberada en la combustión. El cisco de café, tiene el mayor poder calorífico que corresponde con más alto contenido de carbono fijo, esta biomasa presenta un poder calorífico aceptable

Tabla 7 Análisis próximos completos de las biomásas

ANÁLISIS PROXIMOS COMPLETOS				
Análisis	Método	Cascarilla de Arroz	Cisco de Café	Aserrín
Ceniza, % en peso	ASTM D7582-15	15.97	0.66	0.82
Materia Volátil, % en peso	ASTM D 3175-17	60.61	75.40	62.28
Carbono Fijo (por diferencia), % en peso	ASTM D3172-07a (by diff)	15.3	16.17	13.49
Azufre, % en peso	ASTM D4239-17	0.07	0.06	0.04
Poder Calorífico Bruto (Kcal/ Kg)	ASTM D5865-13	3582	4347	3684

Fuente: Ramírez & Ortiz, 2019.

5.7 Análisis petrográfico

El análisis microscópico del carbón nos permite obtener información de la composición maceral del carbón (conteo maceral) y la capacidad reflectiva de estos macerales y determinar la categoría de un tipo de carbón (grado de carbonización y la cantidad y categoría de macerales). Como índice se utiliza la medida de la reflectancia máxima de los distintos componentes orgánicos en una muestra pulverizada y pulimentada de carbón sumergida en un aceite específico para mejorar el contraste, siendo máxima vitrinita y la inertinita y baja para la exinita. (Ver figura 28).

Recuperado de:

https://www.researchgate.net/publication/303250254_Analisis_petrografico_de_carbones_colombianos_mediante_analisis_de_imagenes

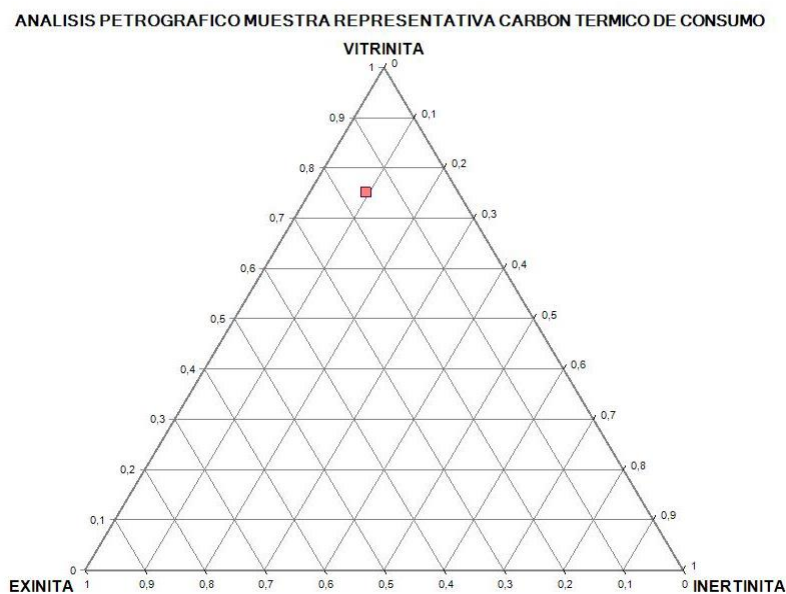


Figura 28 Análisis petrográfico muestra representativa carbón térmico consumo

Por otro lado, las propiedades ópticas de carbón varían al igual que otros parámetros de este en función de la extensión del proceso metamórfico de la carbogénesis, de esta forma la reflectancia aumenta con el incremento de la aromaticidad y el tamaño de las estructuras moleculares y puede ser empleada para la determinación no solo del tipo, sino también del rango del carbón. En este sentido, se considera la denominada reflectancia de la vitrinita, parámetro que presenta como gran ventaja al determinar una propiedad característica del rango sobre un único maceral, con lo cual es aplicable para todo tipo de carbones al objeto de establecer su rango. La técnica de la reflectancia de la vitrinita ha sido correlacionada con resultados óptimos con propiedades del carbón tales como contenidos volátiles, ratio H/C, poder calorífico, índice de hinchamiento y fracciones tras coquizado. Los constituyentes de los carbones que presentan alta reflectancia son los que tienen una combustión más difícil. De esta manera en términos generales, un carbón será más difícil de quemar si tiene una elevada proporción de maceral inertinita o si su rango es elevado (Cortés V, 2008).

Tabla 8 Formación de los macerales de los carbones duros en función del medio y las sustancias vegetales de la procedencia

MACERAL	SUSTANCIAS VEGETALES DE PROCEDENCIA	CARACTERISTICAS DEL MEDIO
Vitrinita	Madera troncos, raíces y hojas vasculares	Anaerobio / Aerobio
Inertita	Madera. (coquizada o degradada bioquímicamente) y restos de hongos	Aerobio
Exinita	Resina, cutículas, esporas, pólenes, algas	Anaerobio

Autor: Vicente Cortés, 2008. Carbón.

5.7.1 Reporte de resultado del análisis petrográfico de la muestra representativa de consumo.

Los resultados de los análisis petrográficos de la muestra representativa del consumo indican que el contenido de vitrinita es de 79,83 %, de liptinita 9,87% y de inertinita 10,30 %. (Ver tabla 9).

Tabla 9 Análisis petrográfico muestra representativa de consumo

Análisis petrográfico		Resultado Base como se recibe %	Total %	Total Reactivos %	Resultado Base libre de materia mineral %
VITRINITA	V4	11,3	75,2	86,8	79,83
	V5	29,3			
	V6	24,8			
	V7	8,3			
	V8	1,5			
LIPTINITA	Exinita	9,7	9,7		9,87
	Resinita	0			
INERTINITA	Semifusinita reactiva	1,9	1,9		10,30
	Semifusinita inerte	3,6	13,2		
	Micrinita	2,2			
	Fusinita	1,6			
Materia mineral		5,8			

5.8 Clasificación del carbón.

Según la Sociedad Americana para Pruebas y Materiales, (ASTM, **American Society for Testing and Materials**), desarrolló un método de clasificación de carbones basado en parámetros

obtenidos mediante ensayos normalizados. La norma busca que las propiedades utilizadas para la clasificación sean lo suficientemente sencillas de determinar mediante el análisis próximo y el poder calorífico (ASTM 2012). La terminología derivada de esta norma es de uso extendido a nivel mundial y estandariza el uso de términos como poder calorífico (PC), materia volátil (MV), humedad (Hd), ceniza (Cz) y carbono fijo (CF). Particularmente, la norma ASTM D 388-12 es una de las de mayor aceptación para clasificar los carbones. Determina cuatro clases básicas en orden descendente y 12 sub-categorías según la composición química y el grado de madurez. Adicionalmente, a efectos de calcular el poder calorífico superior, el contenido en volátiles y el carbono fijo con o sin incluir el contenido inherente de humedad, también propone expresiones para cambiar de base seca a húmeda. Estas expresiones (Ecuaciones 1-3) consideran además que parte del azufre y el agua de algunos minerales que forman las cenizas, se eliminan durante la combustión de la muestra para el análisis elemental (Parr S, 1928).

$$CF_{s, lmm} = \frac{100(\%CF - 0,15\%S)}{[100 - (Hd + 1,08\%Cz + 0,55\%S)]} \quad (1)$$

$$MV_{s, lmm} = 100 - CF_{s, lmm} \quad (2)$$

$$CF_{s, lmm} = \frac{100(PCSS - 50\%S)}{[100 - (1,08\%Cz + 0,55\%S)]} \quad (3)$$

Donde, s = base seca, h = base húmeda, lmm = libre de material mineral, S = azufre, Cz = ceniza, Hd = humedad, PCS = poder calorífico superior (Btu/ lbm). La norma define como carbones de bajo rango aquellos cuyo poder calorífico superior, en base húmeda, sea menor a 26,8MJ/kg (11500 BTU/lbm), en este rango están los carbones denominados subbituminosos y los lignitos. En los carbones de alto rango, con un poder calorífico mayor a 26,8MJ/kg, se

incluyen los carbones bituminosos y antracita. Así, a mayor rango, mayor es el contenido en carbono fijo y mayor el poder calorífico, mientras que disminuyen su humedad y la cantidad de materia volátil. De esta manera, en orden descendente por su rango, se tiene la clasificación: antracita, bituminoso, sub – bituminoso y lignito, (Véase Tabla 10).

Tabla 10 Clasificación de carbones por rango, (ASTM D-388)

Clase	Límites de carbono fijo /% m, bslmm		Límites de Materia Volátil / % m, bslmm		Límites de Poder Calorífico Btu/lb /%m, bhlmm		Carácter Aglomerante
	Igual o mayor que	Menor que	Igual o mayor que	Menor que	Igual o mayor que	Menor que	
Antracíticos							
Meta-antracita	98	-	-	2	-	-	No aglomerante
Antracita	92	98	2	8	-	-	
Semiantracita	86	92	8	14	-	-	
Bituminoso							
Bituminoso Bajo Volátil	78	86	14	22	-	-	Comúnmente aglomerante
Bituminoso Medio Volátil	69	78	22	31	-	-	
Bituminoso Alto Volátil A	-	69	31	-	14000		
Bituminoso Alto Volátil B	-	-	-	-	13000	14000	
Bituminoso Alto Volátil C	-	-	-	-	11500	13000	
Subbituminoso							
Subbituminoso A	-	-	-	-	10500	11500	No aglomerante
Subbituminoso B	-	-	-	-	9500	10500	
Subbituminoso C	-	-	-	-	8300	9500	
Lignitos							
Lignito A	-	-	-	-	6300	8300	No

Lignito B	-	-	-	-	-	6300	aglomerante
------------------	---	---	---	---	---	-------------	--------------------

Fuente: Manual sobre métodos de muestreo, preparación y análisis de carbón y coque.

% m: porcentaje en masa, bsllmm: Base seca libre de materia mineral, Bhlmm: Base húmeda libre de materia mineral.

Normativa ISO.

En Europa la normativa ISO 11760-2005 emplea un sistema para clasificar los carbones por su rango (ver figura 29), utilizando tres categorías aplicables a todos los rangos existentes en la norma ASTM D388: rango alto, rango medio y rango bajo.

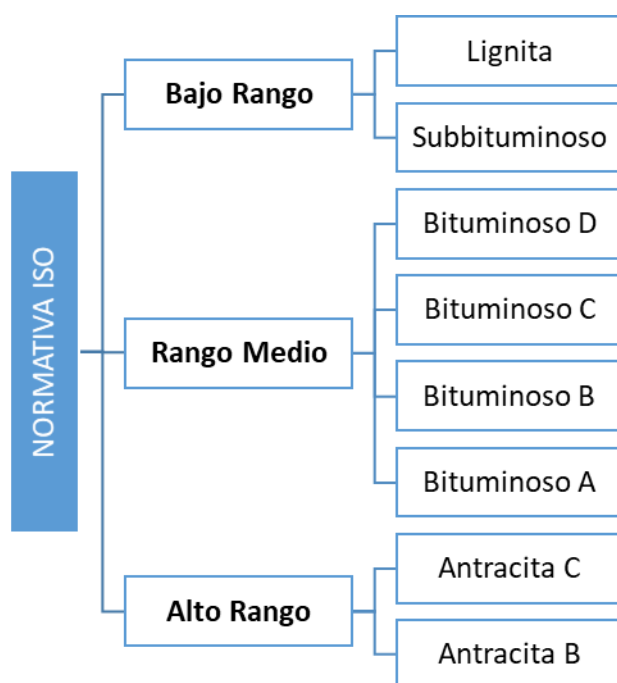


Figura 29 Clasificación de los carbones, según la norma ISO 11760 - 2005

5.8.1 Reporte de resultado de análisis próximos de la muestra representativa del consumo en diferentes bases.

Según los resultados obtenidos de la muestra de carbón representativa del consumo en base seca libre materia mineral (slmm) descritos en la tabla 11 y a la tabla 10 de clasificación por rango según la norma ASTM D388 presenta un contenido de carbono fijo menor al 69 % y un

mayor contenido de materia volátil al 31%, con un poder calorífico de 14.302 Btu/Lb, indica que se clasifica como un carbón bituminoso tipo A de alto volátil y de rango medio con la normativa ISO 11760.

Tabla 11 Análisis próximos de la muestra representativa del consumo en diferentes bases.

ANÁLISIS PRÓXIMO COMPLETO ASTM COAL H D3302, C D						
Análisis	Método	Base como se recibe	Base seca	Secado al aire	Base seca, libre de cenizas DAF	Base seca, libre materia mineral
Humedad Total, % en peso	ASTM D3302/D3302M-15	8,16				
Ceniza, % en peso	ASTM D 3174-12	8,99	9.79	9,46		
Materia Volátil, % en peso	ASTM D 3175-11	42,41	46.18	44,60	51.20	45.56
Carbono Fijo (por diferencia), % en peso	ASTM D 3172-13	40,44	44.03	42,50		54.43
Azufre, % en peso	ASTM D 4239-14 E02	1,29	1.41	1.36		
Poder Calorífico Bruto (Kcal/Kg)	ASTM D5865-13	6505	7083	6839	7852	
Poder Calorífico Bruto (Btu/Lb)	ASTM D5865-13	11709	12750	12311	14133	14302

5.9. La calorimetría diferencial de barrido DSC de biomásas y carbón

La calorimetría diferencial de barrido (Differential Scanning Calorimetry DSC) de las muestras de biomásas y de carbón, es una técnica experimental dinámica que permite determinar

la cantidad de calor que absorbe o libera una sustancia, bien cuando es mantenida a temperatura constante durante un tiempo determinado, o cuando es calentada o enfriada a velocidad constante, en un determinado intervalo de tiempo, con la ventaja adicional que actualmente puede ser utilizada en amplios rangos de temperatura que van desde los $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta aproximadamente $800\text{ }^{\circ}\text{C}$. Esta técnica permite el estudio de aquellos procesos en los que se produce una variación entálpica, determinando las temperaturas donde ocurren cambios físicos o químicos, puntos de cristalización y ebullición, entalpias de reacción y determinación de otras transiciones de primer y segundo orden. (Granados, Y. 2015) (Véase figura 30-37).

5.9.1. Descripción Del Procedimiento de la Calorimetría Diferencial de Barrido, DSC

Se dispone de dos cápsulas. Una de ellas contiene la muestra a analizar y la otra está vacía y es la llamada cápsula de referencia. Se usan calefactores individuales para cada cápsula y un sistema de control comprueba si se producen diferencias de temperatura entre la muestra y la referencia. Si se detecta cualquier diferencia, los calefactores individuales regulan el desequilibrio de tal manera que la temperatura se mantendrá igual en ambas cápsulas. Es decir, cuando tiene lugar un proceso exotérmico o endotérmico, el instrumento compensa la energía necesaria para mantener la misma temperatura en ambas cápsulas.

5.10 Análisis por Termo Gravimetría (TGA) de biomasas y carbón

El Análisis por Termo Gravimetría (Thermo Gravimetric Analysis TGA) es el porcentaje del peso de una muestra frente al tiempo o a la temperatura mientras se somete a un programa de temperatura controlado en una atmósfera específica. Lo habitual es que se produzca una pérdida

de peso, sin embargo, también es posible que haya una ganancia de peso en algunos casos. La atmósfera puede ser estática o dinámica con un caudal determinado (también se emplean condiciones de presión reducida) y los gases más habituales son N₂, aire, Ar, CO₂. También se usan H₂, Cl₂, o SO₂. (Granados, Y. 2015).

Una característica fundamental de la técnica TGA es que sólo permite detectar procesos en los que se produce una variación de peso tales como descomposiciones, sublimaciones, reducción, desorción, absorción, mientras que no permite estudiar procesos como fusiones (Granados, Y. 2015).

En las figuras 30 a la 37 se pueden observar los análisis térmicos Calorimetría Diferencial de Barrido, DSC y Termo Gravimetría (TGA) de biomasas y carbón

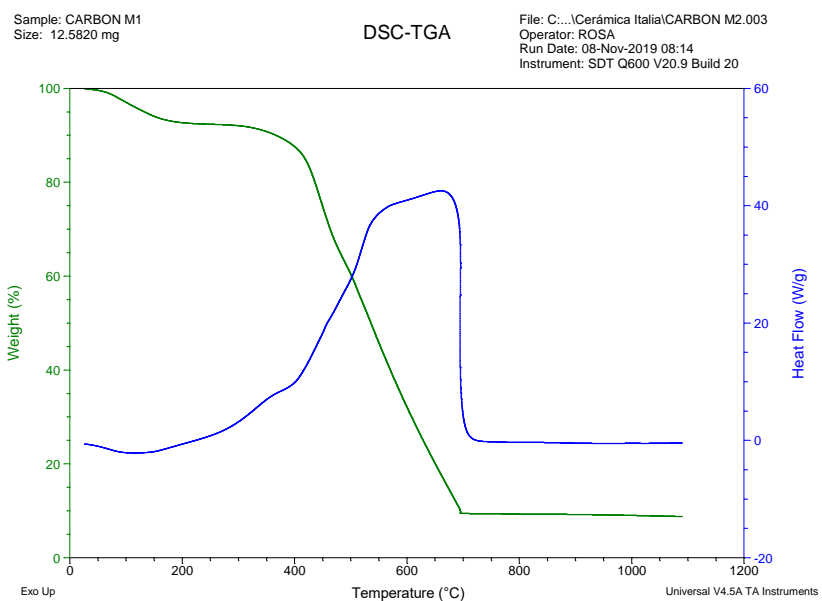


Figura 30 Gráfica DSC –TGA muestra 1 carbón

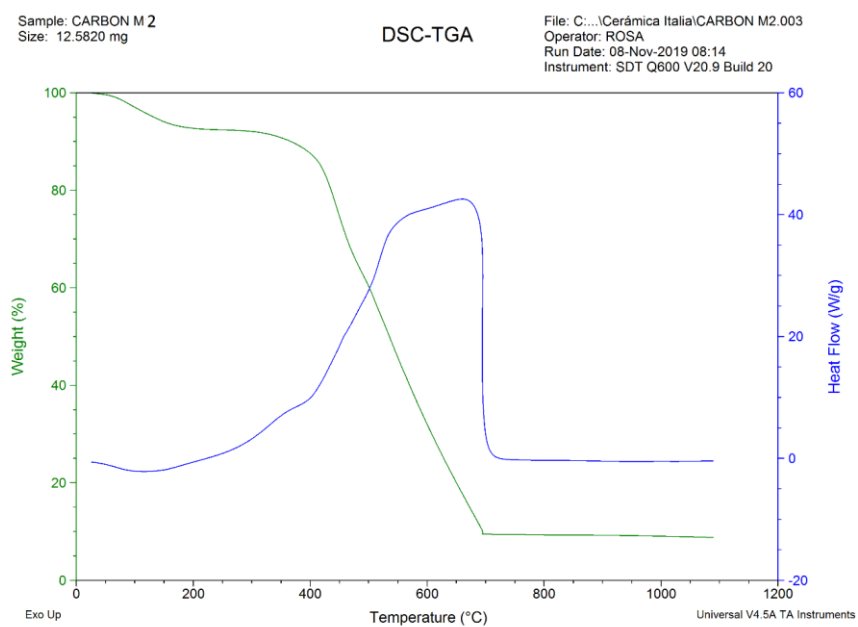


Figura 31 DSC-TGA muestra carbón 2

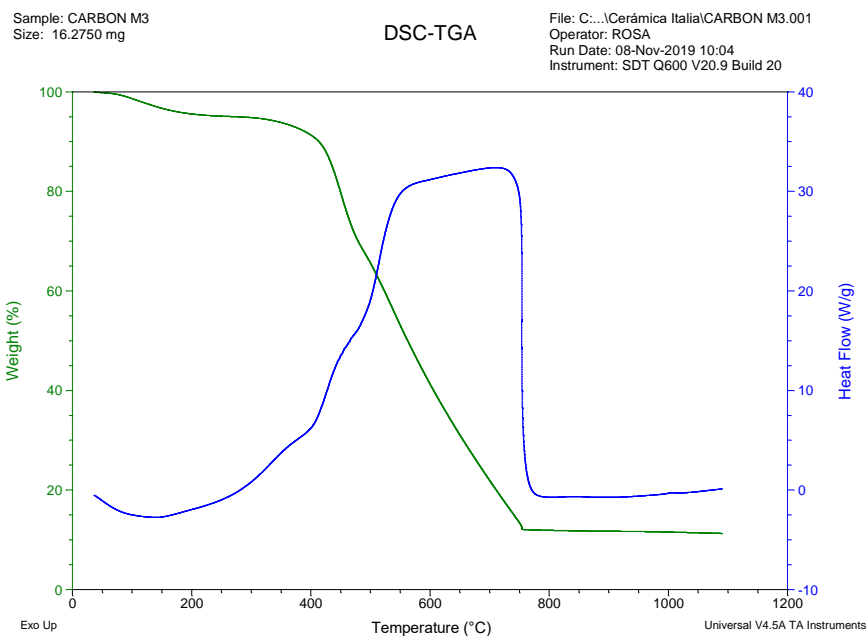


Figura 32 Gráfica DSC –TGA muestra carbón 3

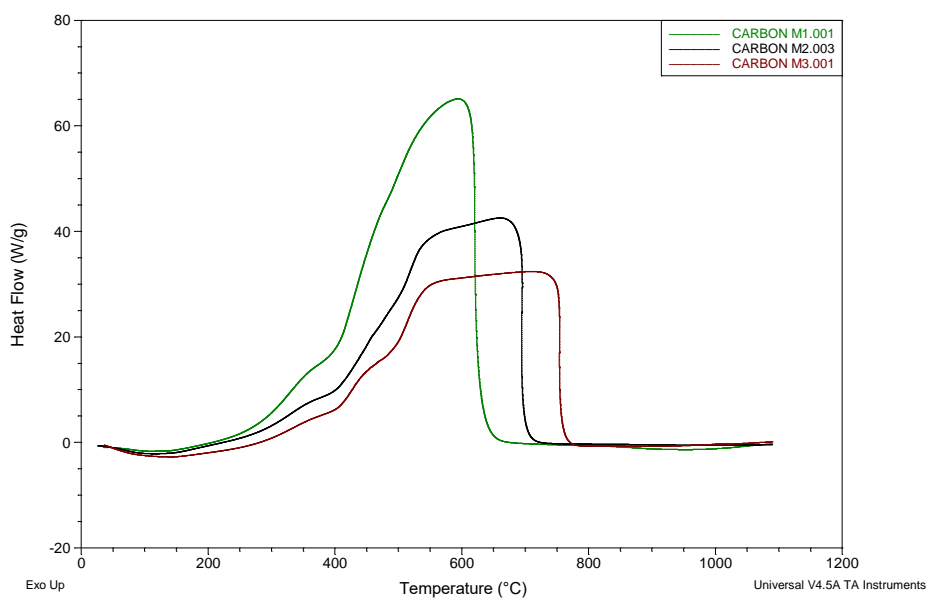


Figura 33 Gráfica DSC M1, M2, M3 de carbón

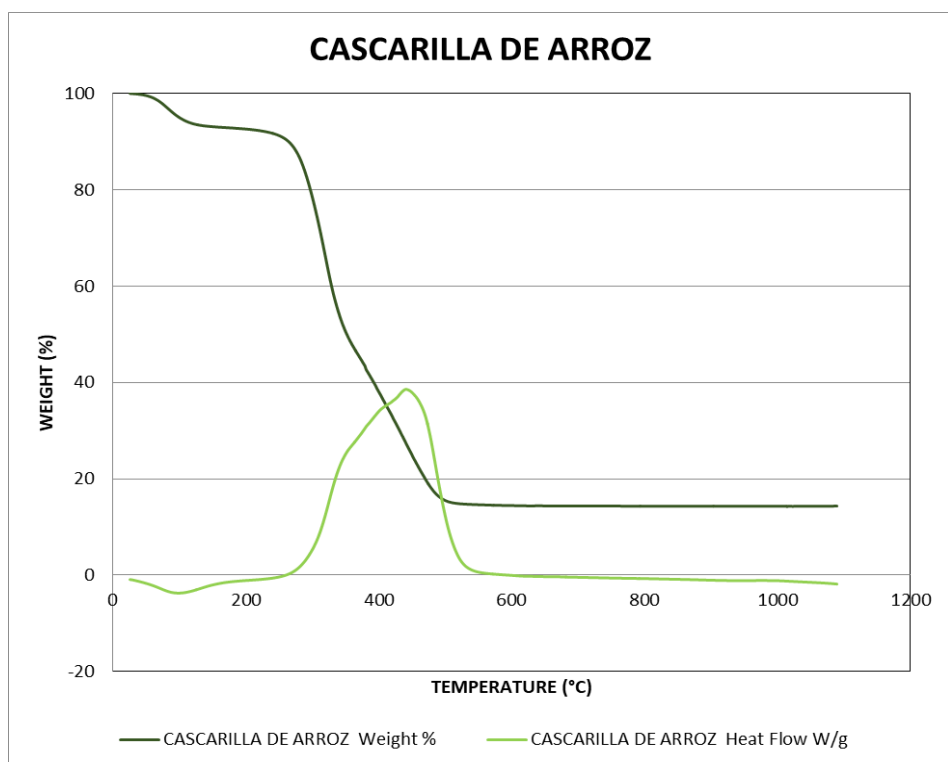


Figura 34 Gráfica DSC-TGA cascarilla de arroz

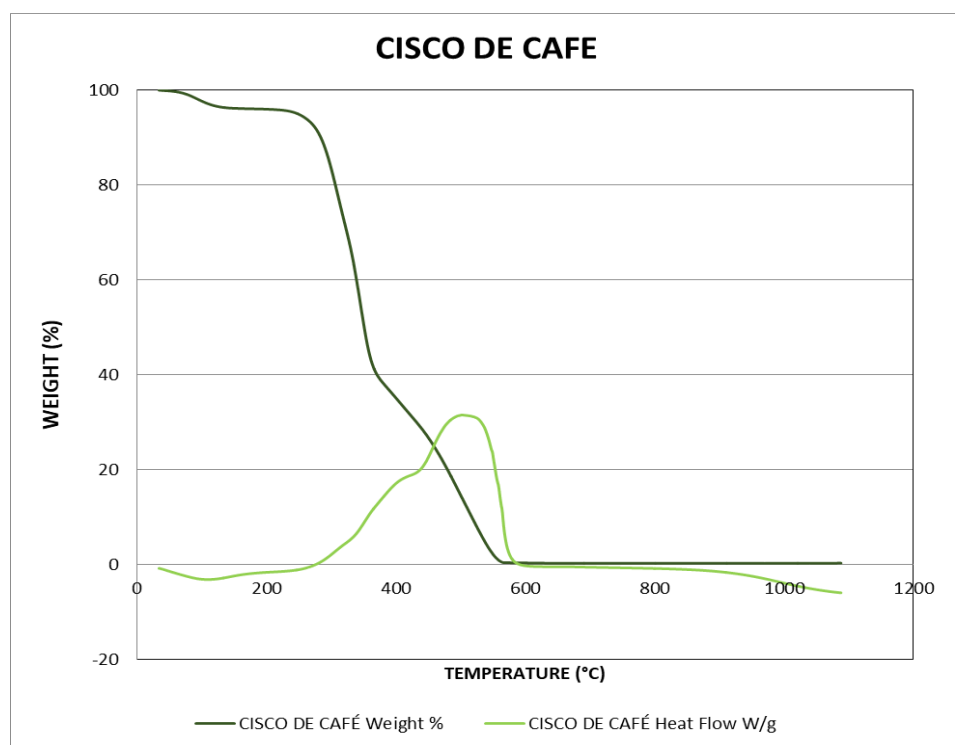


Figura 35 Gráfica DSC-TGA Cisco de café

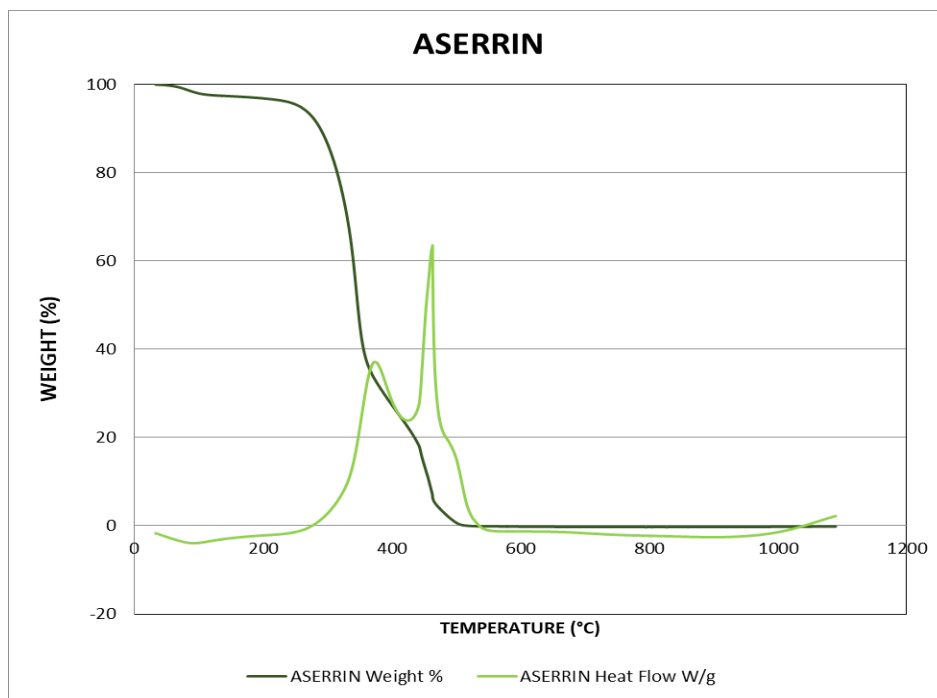


Figura 36 Gráfica DSC-TGA Aserrín

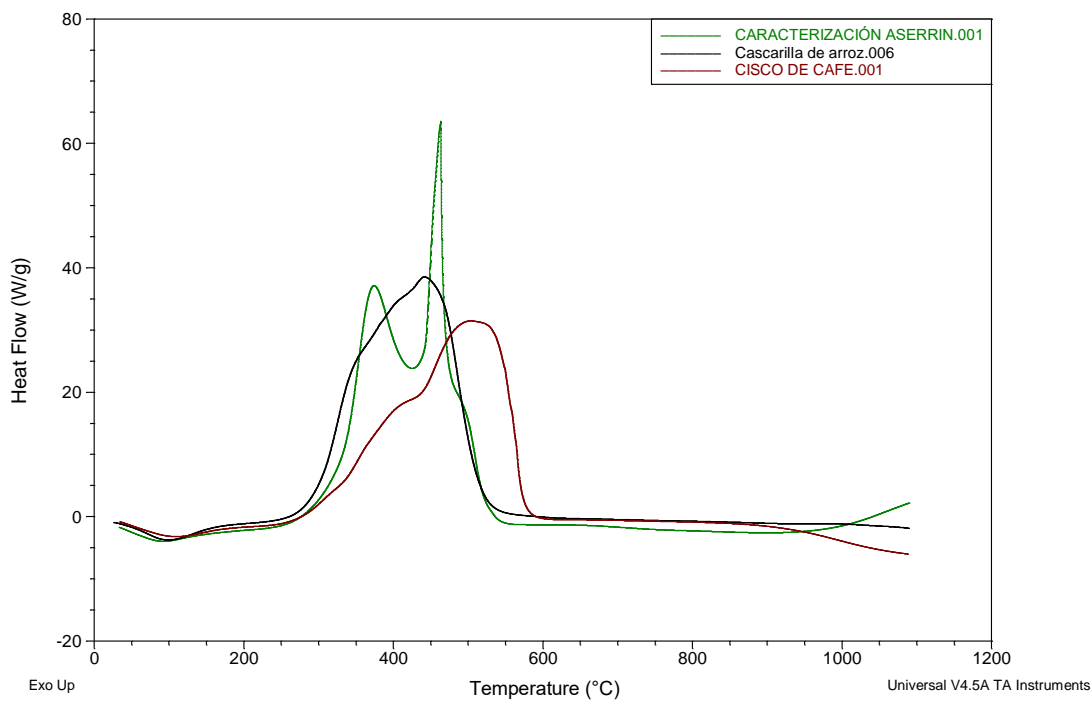


Figura 37 Gráfica DSC de cascarilla de arroz, cisco de café, aserrín

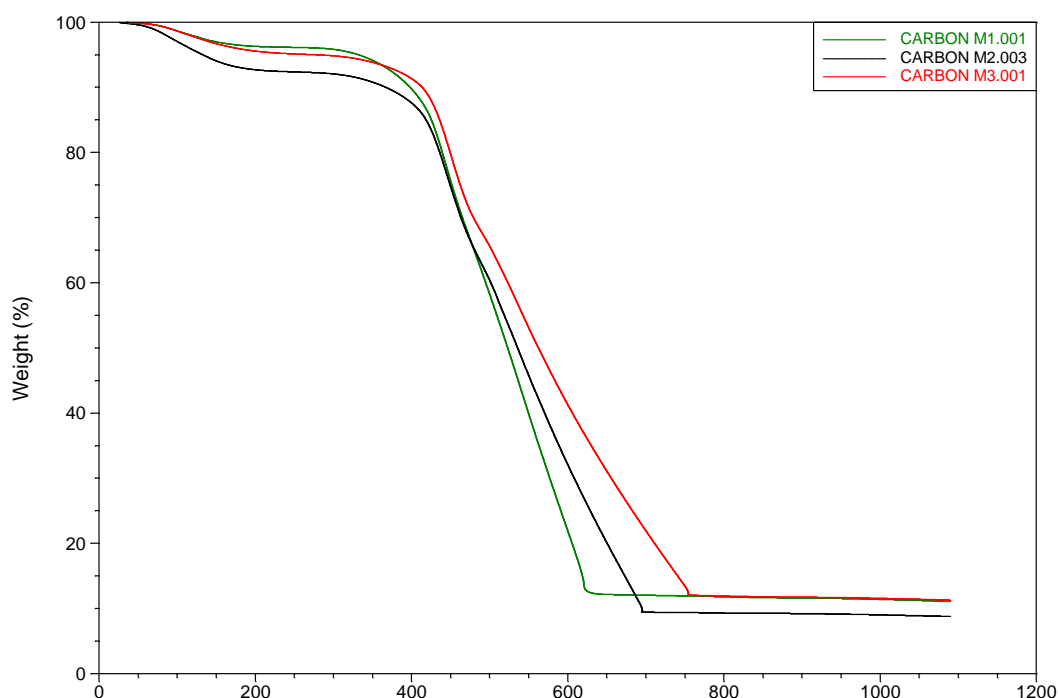


Figura 38 Gráfica TGA M1, M2, M3 de carbón

En la figura 38 se hace un comparativo de las curvas obtenidas del análisis Termogravimétrico, TGA de las muestras de carbón representativas, se observa que el secado es la primera etapa en el proceso de combustión que se manifiesta hasta a una temperatura de 160 °C. La adsorción del oxígeno es la segunda etapa donde se observa una ligera ganancia de masa hasta una temperatura, que para esta investigación es aproximadamente 315°C, luego sigue la descomposición térmica, temperatura a partir de la cual se presenta una pérdida alta de volátiles que salen de la partícula hasta una temperatura cercana a los 630 °C, para las muestras identificadas como M2 y M3 hasta una temperatura 700 °C y 750 °C; respectivamente. El proceso continúa con la combustión del carbonizado y la transformación de la materia mineral en óxidos o cenizas hasta la temperatura final.

Para las biomásas se hace un comparativo de las curvas obtenidas del análisis Termogravimétrico, TGA (vease figura 39), la primera etapa, se identifica hasta a una temperatura de

110 °C. La segunda zona o de adsorción está solapada con el inicio del proceso de pirólisis, en primer lugar por el rompimiento de la estructura molecular de la hemicelulosa, luego con el de la celulosa que aporta la mayor parte de la materia volátil y finalmente con la lignina que es el componente más estable térmicamente (Kicherer, U. Greul, H. Spliethoff, and K. R. G. Hein 1996), la pérdida alta de volátiles llegaría hasta una temperatura cercana a los 500 °C para el aserrín, para la cascarilla de arroz una temperatura de 520 °C y para el cisco de café hasta una temperatura de 560 °C; El proceso continúa con la combustión de la materia en óxidos o cenizas hasta la temperatura final.

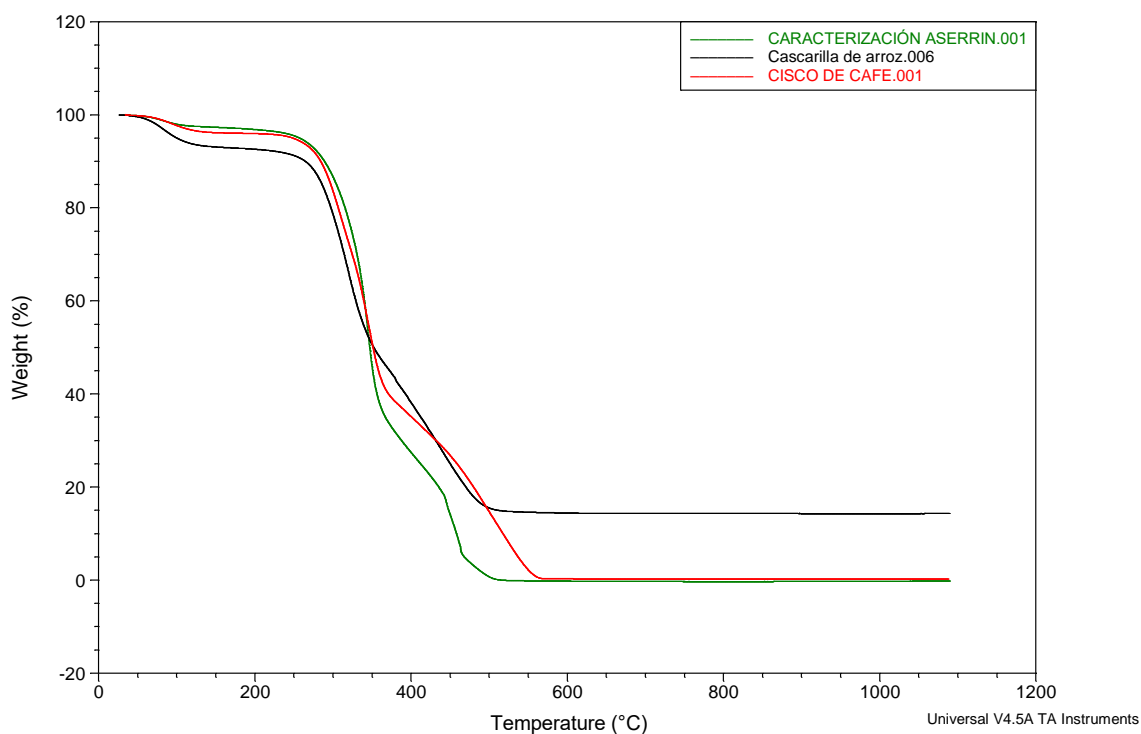


Figura 39 Gráfica TGA de las biomásas

5.11 Análisis químicos de las biomasas y carbón

En el Anexo 4 da a conocer los valores cuantitativos expresados en porcentaje de los óxidos generales realizado por espectrometría de fluorescencia de rayos X por longitud de onda en el equipo difractómetro de rayos X marca ARL Thermo Fisher modelo 9900 WorkStation a las muestras representativas de carbón y biomasa, la preparación de las muestras de análisis fue realizada mediante pastilla prensada en el laboratorio XAMTEC S.A.S. Además, se tiene en cuenta las pérdidas por ignición a 1000 °C durante una hora, denotado por las siglas LOI (debido a las iniciales en inglés Loss Of Ignition), esta técnica de análisis no descarta presencia de elementos NO reportados en concentraciones menores a 100 ppm.

5.11.1. Reporte de resultados de análisis químicos de las biomasas y carbón de consumo

De los resultados mostrados en la Tabla 12 se observa un alto contenido de óxidos de silicio, aluminio y hierro en todas las muestras de carbón y la cascarilla de arroz, mientras que el cisco de café que presenta el menor contenido en óxidos de silicio, aluminio y de hierro. Además, se observa bajo contenido de óxido de titanio en las cenizas obtenidas de las muestras de carbón. Los óxidos básicos están en una menor proporción, las muestras identificadas como M1 y M2 del carbón se destacan con el mayor contenido de óxidos de magnesio y de sodio, las tres muestras de carbón contienen más óxido de calcio y las de biomasa presentan mayor contenido de óxido de potasio. Es de notar que las muestras M1 y M2 de carbón presentan mayor contenido de azufre.

Tabla 12 Resultados de análisis químicos

MUESTRA	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	TiO ₂	Cl	Al ₂ O ₃	K ₂ O	SO ₃	MnO	MgO	SrO	P ₂ O ₅	Na ₂ O	LoI	Total
Cascarilla de arroz	87,30%	0,23%	2,03%		1,22%	0,46%	5,10%	0,75%	0,35%	0,52%		1,91%	0,12%		100,00%
Cisco de café	16,88%	5,19%	44,16%			5,19%	15,58%	5,19%		5,19%		2,60%			100,00%
Aserrín	40,00%	22,73%	17,27%			7,27%	7,27%	1,82%	1,82%	1,82%	0,00%	0,00%			100,00%
Carbón M1	35,75%	18,62%	11,39%	1,41%		17,30%	1,32%	13,24%	0,26%	0,71%	0,00%				100,00%
Carbón M2	23,10%	19,16%	28,81%	1,52%		13,07%	0,63%	11,42%	1,40%	0,63%	0,25%				100,00%
Carbón M3	34,17%	20,37%	10,14%	1,35%	17,57%	1,25%	14,00%	0,29%	0,68%	0,19%					100,00%

Fuente: Ramírez & Ortiz, 2019.

5.11.2 Comportamiento de las cenizas de biomasa y carbón.

El carbón contiene cantidades relativamente más alta de arcillas minerales y un menor contenido de metales alcalinos y alcalinotérreos (Jenkins M. y R. Miles Jr 2004). Estas diferencias composicionales afectan el comportamiento de las cenizas en combinación con la presencia de la sílice (Si) o azufre (S) y facilitadas por la presencia de cloro (Cl) provocando el problema de escorificación y fouling, adicionalmente es influenciado por la forma o naturaleza química en que se encuentra los compuestos.

Los problemas claves de la operación de la hornalla relacionados con las características de cenizas están asociados con su mayoría con los componentes alcalinos inorgánicos procedentes de los combustibles, principalmente el K y Na puede ser una fuente para la formación de aglomerados fundidos o parcialmente fundidos y depósitos de escoria a alta temperatura en la parrilla. Puede generar problemas de distribución no homogénea del aire en la parrilla con la consiguiente generación de zonas de malas condiciones de combustión.

La formación de depósitos de ceniza a temperaturas más bajas en la sección de convección con una pérdida de la eficiencia y capacidad de la caldera y un aumento de la corrosión de las superficies metálicas (M. Romero 2009).

El daño acelerado de las superficies metálicas por corrosión y/o erosión. Las partículas arrastradas pueden cubrirse con una capa adhesiva formando superficies pegajosas o pudiendo crecer hacia aglomerados más grandes debido a la formación de enlaces permanentes causado por colisiones (Hulkkon S. 1995).

La tendencia a la escoriación de acuerdo con los índices de “fouling” y “slagging” varía desde bajo hasta severa, dependiendo de la composición química del combustible y la de sus cenizas y del tipo de asociación orgánica /inorgánica que presenta los elementos S, Cl, Na y K.

Para conocer el comportamiento de las cenizas se utilizan diferentes índices para establecer las posibilidades de fouling y slagging (Véase tabla 13):

Tabla 13 Índices de fouling y slagging

Índice de slagging y fouling											
Índice	Formula	Clasificación para slagging y fouling				Muestras					
		Bajo	Medio	Alto	Severo	M1	M2	M3	Cascarilla de arroz	Cisco de café	Aserrín
Relación ácido-base	$R\ b/a = \frac{(Fe_2O_3 + CaO + MgO + K_2O + Na_2O)}{(Si_2O_2 + TiO_2 + Al_2O_3)}$	< 0,4	>0,7	0,4 a 0,7		0,58 A	1,30 M	0,6 A	0,09 B	3,17 M	1,03 M
Slagging index	SI = R b/a * S	< 0,6	<2	<2,6	>2,6	0,7 M	1,5 M	1 M	0 B	0,2 B	0,05 B
Fouling	FI = R b/a * Na ₂ O	<0,2	<0.5	<1	>1	0 B	0 B	0,1 B	0 B	0 B	0,1 B
Relación Hierro / Calcio	$\frac{Fe_2O_3}{CaO}$	<0,3 y >3	0.3 a 3			1,63 M-S	0,66 M-S	2,01 M-S	0,11 B	0,11 B	1,31 M-S
Relación Hierro + Calcio	Fe ₂ O ₃ + CaO	<1				0,30 B	0,48 B	0,31 B	0.02 B	0,49 B	0,40 B

6. Resultados y análisis de las biomásas

6.1 Análisis elemental de las biomásas

Tabla 14 Análisis elemental de las biomásas

ANÁLISIS BIOMASAS				
Análisis	Método	Cascarilla de arroz	Cisco de café	Aserrín
Cenizas	AOAC 942.05	16.48%	0.55%	1,42%
Fibra detergente Ácida (FDA)	AOAC 973.18	55.58%	68.77%	72.61 %
Fibra detergente Neutro (FDN)	AOAC 2002.04	68.27%	85.63%	84.03 %
Humedad	AOAC 925.10	6.31%	6.91%	26.90 %
Celulosa	AOAC 973.18	33.93%	51.69%	51.83 %

Fuente: Ramírez & Ortiz, 2019.

En la tabla 14 de análisis elemental de las biomásas se observa que el aserrín tiene un alto contenido de humedad este parámetro afecta al contenido energético del combustible de una forma proporcional. Además, hay que considerar que a medida que el combustible esté más seco hasta ciertos límites será mejor su comportamiento de combustión, la composición las biomásas presenta un alto contenido de FDA (Fibra detergente ácido) es la cuantificación de la lignina y celulosa para su aprovechamiento energético. En las biomásas arrojan un alto contenido de celulosa que aporta la mayor parte de la materia volátil facilitando la combustión (Kicherer, U. Greul, H. Spliethoff, and K. R. G. Hein 1996). La cantidad de ceniza de cisco de café y el aserrín es menor del 2% lo que indica que son biomasa aceptable para el aprovechamiento de calor.

Es importante notar que el contenido de cenizas reportado en la Tabla 14 con respecto al análisis próximo (Tabla 7) es ligeramente diferente por las técnicas de determinación empleadas para cada análisis.

6.1.1. Cenizas AOAC 942.05

Se denomina a la materia inorgánica que forma parte constituyente de los alimentos (sales minerales). Las cenizas permanecen como residuo de la calcinación de la materia orgánica del alimento. La calcinación debe efectuarse a una temperatura adecuada, que sea lo suficientemente alta como para que la materia orgánica se destruya totalmente, pero tenemos que observar que la temperatura no sea excesiva para evitar que los compuestos inorgánicos sufran alteración (fusión, descomposición, volatilización o cambio de estructura). La condición de acreditado puede cambiar dependiendo de la matriz. (Análisis Químicos (2015).

6.1.2. Fibra Detergente Neutro (FDN)

El residuo fibroso (FDN) es una medición de la celulosa, hemicelulosa y lignina, representando las paredes celulares de los forrajes, se obtiene luego de disolver con detergente neutro los compuestos presentes en el contenido celular junto con sustancias de la pared celular de fácil digestión (e.g. pectinas).

Equipos

Balanza analítica.

Estufa de secado regulada a 105°C.

Aparato de digestión- ANKON 200/220 FIBER ANALYZER

Bolsitas filtrantes- ANKON Technology F57 filter bags

Desecador. · Sellador por calor.

Procedimiento:

1. Preparación de la muestra (pueden procesarse un máximo de 24 bolsas por digestión).
 - a. Rotular debidamente las bolsitas filtrantes (2 por cada muestra a analizar y 2 para los blancos).
 - b. Pesar las bolsas de filtro (T1) y llevar a cero la balanza.
 - c. Pesar aproximadamente 0,5 g (+/- 0,05 g) de la muestra molida y secada a 65°C (MH1) (para alimentos con bajo contenido de agua solo es necesario molerlos) directamente en la bolsa de filtro.
 - d. Pesar dos bolsitas de filtro para determinar el blanco (Tbco1).
 - e. Sellar por calor las bolsas cercano al borde (ca. 4 mm) cuidando que el lado interno de las mismas esté bien limpio para garantizar el sellado.
 - f. Distribuya la muestra uniformemente dentro de las bolsas.
 - g. Exceptuando las muestras de forraje, las restantes deberán ser sometidas a un lavado por inmersión con acetona durante 3 min y luego las muestras se deben secar completamente antes de ser sometidas a la digestión.
2. Para procesar las 24 bolsas se agregan 2000 ml de solución de Detergente Neutro (SDN) dentro del vaso de digestión. Si se procesan menos de 20 bolsas se agregan 100 ml/bolsa de la SDN. El volumen mínimo de solución es de 1500 ml.
3. Agregar 4 ml de la alfa amilasa termoestable durante la digestión. En caso de no realizar el procedimiento secuencial para la determinación de fibra en detergente ácido (FDA) adicionar

también 20 g (0,5g/50ml de NDS) de sulfito de sodio en la solución en el vaso de digestión. Si se realizará el procedimiento secuencial de determinación de FDA se debe omitir el agregado de sulfito de sodio.

4. Calentar hasta 90-100°C la SDN dentro del vaso digestor antes de colocar las muestras.

5. Poner las bolsas con las muestras en la gradilla y una vez que la solución está caliente, colocar en el vaso digestor. Cerrar y sellar el vaso de digestión. Digestar durante 60 minutos.

6. Interrumpir la agitación y el calentamiento, abrir la válvula y dejar salir la solución (precaución: la solución dentro del vaso está bajo presión). La válvula se abre primero para liberar la presión, para luego abrir la tapa del vaso. Una vez liberada la solución se debe volver a cerrar la válvula.

7. Después de que la solución ha salido toda del vaso se abre la tapa del mismo. Se agrega ca. 2000 ml de agua destilada a 70-90°C con 4 ml de alfa amilasa. Se cierra el vaso y se prende el agitador por 3 – 5 min. Luego se libera el agua y se repite el procedimiento cuatro veces en total, siendo solo en los dos primeros que se agrega la amilasa.

8. Sacar las bolsas del digestor y sacar el exceso de agua de las mismas presionándolas. Lavar las bolsitas con acetona por inmersión durante tres minutos. Remover el exceso de acetona por presión.

9. Dejar secar las bolsas a temperatura ambiente. Luego completar el secado a 105°C durante 4 horas. Enfriar en desecador y pesar las muestras (T+aFDN) y los blancos (Tbco2). (Análisis Químicos 2015).

6.1.3. Fibra Detergente Ácido (FDA)

Se denomina fibra insoluble en detergente ácido (FDA), es la cuantificación de la celulosa y lignina. A medida que el contenido de lignina aumenta la digestibilidad de la celulosa disminuye.

Equipos:

- Aparato de digestión- ANKON 200/220 FIBER ANALYZER
- Balanza de precisión.
- Bolsitas filtrantes - ANKON Technology F57 filter bags
- Desecador.
- Sellador por calor.

Procedimiento:

1. Preparación de la muestra

- a. En caso de utilizar el procedimiento secuencial para la determinación FDN, seguir el protocolo desde el punto siguiente "g")
- b. Rotular debidamente las bolsitas filtrantes (2 por cada muestra a analizar y 2 para los blancos).
- c. Pesar la bolsa de filtro (T1) y llevar a cero la balanza.
- d. Pesar 0,5g (+/- 0,05 g) de la muestra molida y secada a 65°C (MH1), Pesar una bolsa de filtro y digerirla para determinar el blanco (Tbco1).
- e. Sellar por calor las bolsas cercano al borde (ca. 4 mm) cuidando que el lado interno de las mismas esté bien limpios para garantizar el sellado.

f. Distribuya la muestra uniformemente dentro de las bolsas.

g. Pueden procesarse un máximo de 24 bolsas por vez.

2. Para procesar las 24 bolsas se agregan 2000 ml de solución de Detergente Ácido dentro del vaso de digestión. Si se procesan menos de 20 bolsas se agrega la solución SDA a razón de 100 ml/bolsa. El volumen mínimo de solución es de 1500 ml.

3. Calentar hasta 90-100°C la solución de detergente dentro del vaso digestor antes de colocar las muestras.

4. Poner las bolsas con las muestras en la gradilla y una vez caliente la solución, colocar en el vaso digestor. Cerrar y sellar el vaso de digestión.

5. Después de 60 minutos interrumpir la agitación y el calentamiento, abrir la válvula y dejar salir la solución. Precaución: la solución dentro del vaso está bajo presión. La válvula se abre primero para liberar la presión, para luego abrir la tapa del vaso. Una vez liberada la solución se debe volver a cerrar la válvula.

6. Después que la solución ha salido del vaso se abre la tapa del mismo. Se agrega aproximadamente 2000 ml de agua destilada a 70-90°C. Se cierra el vaso y se prende el agitador por 5 minutos. Luego se libera el agua y se repite el procedimiento dos veces más o hasta obtener pH neutro en el agua de lavado descartada.

7. Sacar las bolsas del digestor y sacar el exceso de agua de las mismas presionando con los dedos. Lavar las bolsitas con acetona por inmersión durante tres minutos. Remover el exceso de acetona por presión.

8. Dejar secar las bolsas a temperatura ambiente. Completar el secado a 105°C durante 4 horas. Enfriar en desecador y pesar las muestras (T1+FDA) y los blancos (Tbco2.). (Análisis Químicos.2015)

6.1.4. Celulosa

Polisacárido (carbohidrato no reductor), de peso molecular elevado, insoluble en agua e insípido. La celulosa está compuesta por unidades de D-glucosa unidas entre sí por enlaces B-1.4 estructuralmente consta de una parte amorfa y otra cristalina (organizada), la cual le confiere protección a la célula y constituye en impedimento estérico al ataque de reactivos (McKendry .2002)

6.1.5. Lignina

Es un polímero ramificado, amorfo y heterogéneo. En los vegetales ayuda a mantener unidos la celulosa y las hemicelulosas entre sí, proporcionando rigidez a la pared celular del material y evita la acción de los microorganismos. (McKendry .2002)

6.1.6. Hemicelulosa

Son carbohidratos que forman una estructura polimérica compleja, ramificada compuesta por la unión de diferentes unidades de pentosas, hexosas y ácidos de estos azúcares. La función de la hemicelulosa es brindar rigidez a la estructura vegetal.

La proporción de celulosa y lignina en una biomasa vegetal es importante para seleccionar su proceso de aprovechamiento energético. La biodegradabilidad de la celulosa es mayor que la de lignina, por lo tanto, la conversión promedio de las plantas que contienen carbón como celulosa es mayor que aquellas con altos contenidos de lignina. A manera de ejemplo, la bioproducción de etanol alcanza elevados rendimientos cuando se utiliza como sustrato una biomasa que posee un alto contenido de celulosa-hemicelulosa (McKendry 2002).

6.1.7. Humedad (Hu)

Es la cantidad de agua presente dentro de una muestra de materia. Es usual expresar la humedad como una relación de masa de agua por masa de materia seca. El proceso de conversión energética de la biomasa se ve afectado por su contenido de humedad. La biomasa con una humedad inferior al 50% pueden ser aprovechadas térmicamente mediante el proceso de combustión directa, pirolisis o gasificación. Para la mayoría de los procesos de conversión energética es imprescindible que la biomasa tenga un contenido de humedad inferior al 30%. Cuando los residuos salen del proceso productivo con un contenido de humedad muy elevado es necesario, antes de ingresar al proceso de conversión de energía, implementar operaciones de secado las cuales incrementan los costos de su aprovechamiento energéticos (McKendry .2002). Por lo anterior es recomendable que una materia orgánica con porcentajes de humedad superior al 50% sea aprovechada energéticamente mediante un proceso bioquímico como la fermentación o la digestión anaerobia. (McKendry .2002).

7. Conformación de las mezclas

Una vez preparadas las muestras se realizaron las siguientes mezclas en proporciones diferentes con el fin de determinar cual ofrece mejores condiciones (véase tabla 15). A las cuales se realizaron los análisis térmicos como análisis Termo Gravimétrico, TGA y Calorimetría diferencial de barrido, DSC: (véase Anexo 5).

7.1 Resultados obtenidos de las mezclas biomasa – carbón

En la figura 40 se observan los resultados obtenidos de los analisis Termo Gravimétrico, TGA de las mezclas de biomasa de 25% y 75% de carbón, en la primera etapa del proceso de combustion representa el secado a una temperatura de 150°C. la segunda etapa es la adsorción de oxigeno que esta solapada con el inicio del proceso de pirolisis, se aprecia en la figura que en las mezclas la cascarrilla de arroz y el aserrin la perdida alta de volatiles llega a una temperatura de 610° C, mientras que la mezcla del cisco de café llega hasta 770° C, el proceso continua con el carbonizado y la transformacion en oxidos o cenizas hasta la temperatura final.

Tabla 15 Mezclas de carbón y biomasa

MEZCLAS	PROPORCIÓN %
CARBÓN- CASCARILLA DE ARROZ	25-75
	50-50
	75-25
CARBÓN- CISCO DE CAFÉ	25-75
	50-50
	75-25
CARBÓN-ASERRIN	25-75
	50-50
	75-25

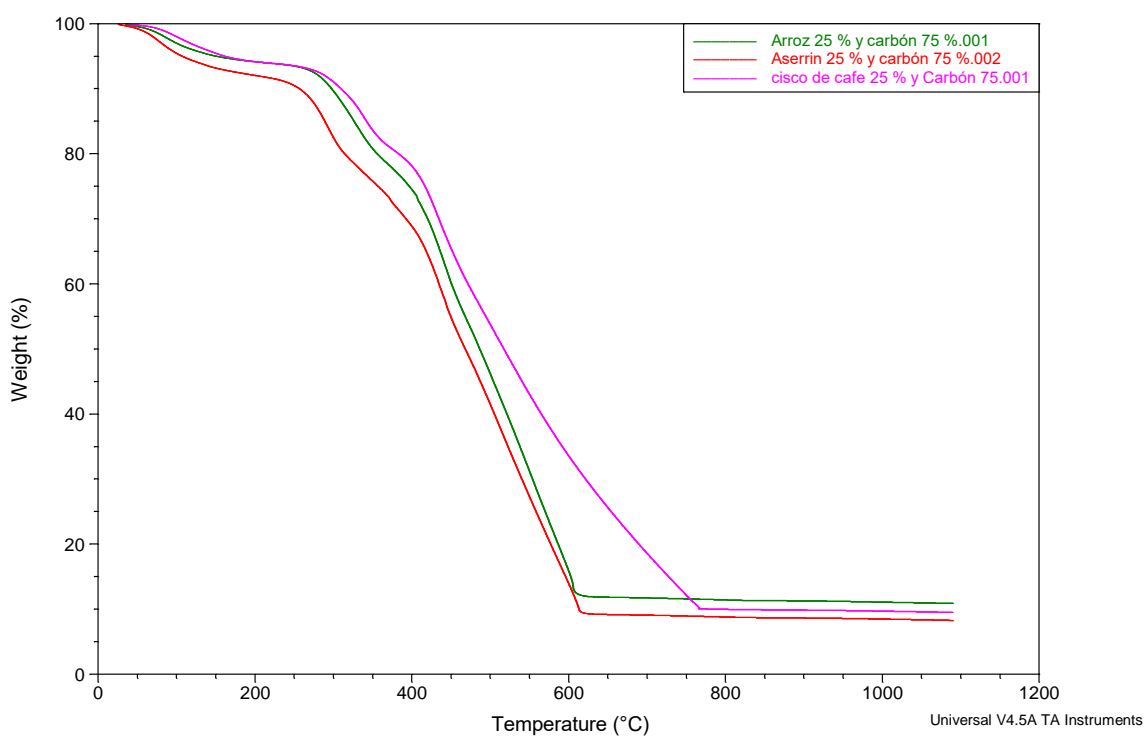


Figura 40 Gráficas de TGA de las mezclas 25% biomasa-75% carbón

Se puede observar en la figura 41 los resultados obtenidos de los análisis Termo Gravimétrico, TGA de las mezclas de biomasa 50% y carbón 50% en su primera etapa de secado es a una temperatura de 130° C, la adsorción de oxígeno es la segunda etapa que esta solapada con el inicio del proceso de pirolisis, dando rompimiento de la estructura molecular de la hemicelulosa, luego con la de la celulosa que aporta mayor parte de la materia volatil donde la cascarilla de arroz llega a una temperatura de 570°C, seguido por el aserrin con una temperatura de 610°C y por ultimo el cisco de café con 645°C. Continuando con el proceso de la combustión de la materia, de oxido o cenizas hasta la temperatura final.

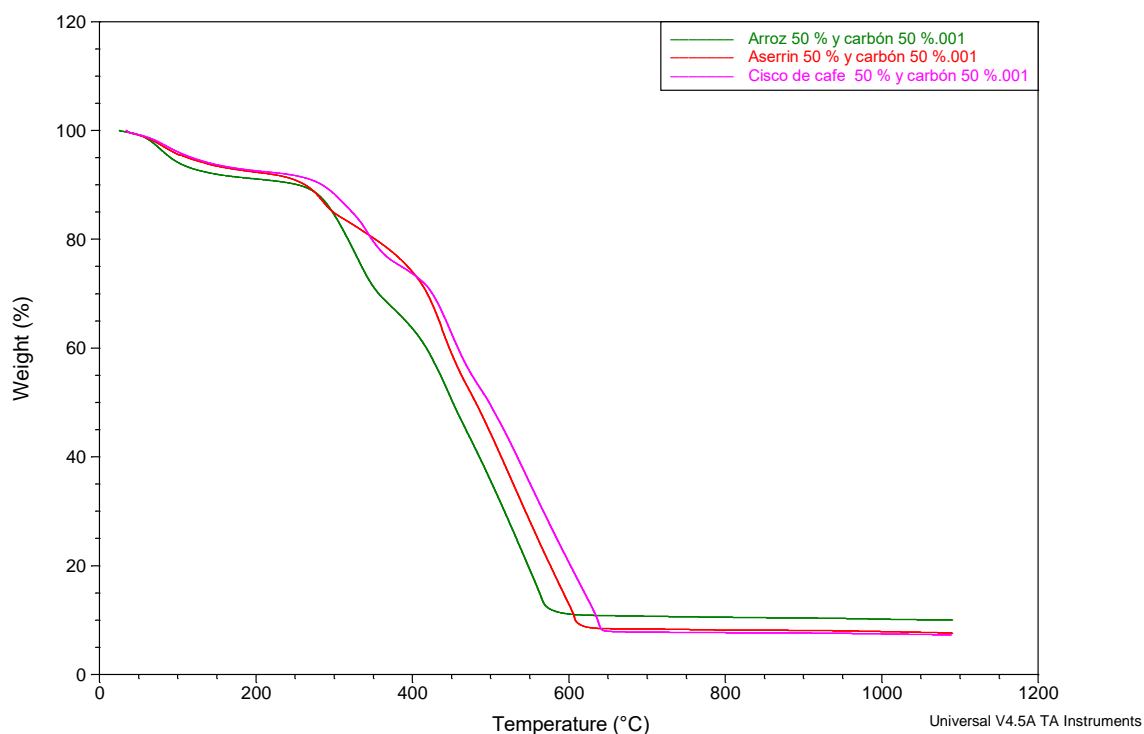


Figura 41 Gráficas de TGA de las mezclas 50% biomasa-50% carbón

En la figura 42 se presentan los resultados obtenidos de los análisis Termo Gravimétrico, TGA de las mezclas de biomasa de 75% y 25% de carbón se observa que la primera etapa del procesos de combustion es el secado a una temperatura de 120°C. La segunda etapa es la adsorción de oxigeno que esta solapada con el inicio del proceso de pirolisis, se aprecia en la figura que en las mezclas de aserrin la perdida alta de volatiles llega a una temperatura de 540° C, mientras la mezcla del cisco de café llega hasta 560° C y la del cisco de café 580°C, el proceso continua con el carbonizado y la transformación en oxidos o cenizas hasta la temperatura final.

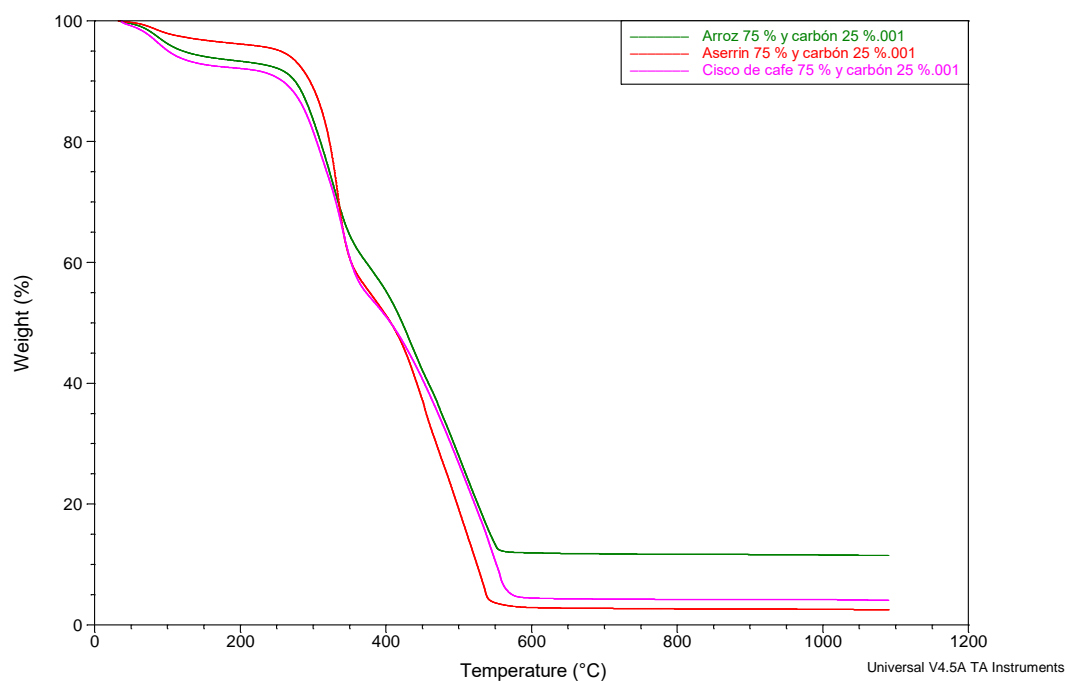


Figura 42 Gráficas de TGA de las mezclas 75% biomasa-25% carbón

En la figura 43 se presentan los resultados obtenidos de Calorimetría diferencial de barrido, DSC de las mezclas de biomasa de 25% y 75% de carbón se observa que en las muestras en la primera etapa de secado es endotérmica debido que requiere calor hasta a una temperatura de 130°C, sin embargo empieza a ganar flujo de calor por la adsorción de oxígeno, luego sigue un desprendimiento de calor, presentando la cascarilla de arroz con un flujo de calor más elevado que las de aserrín y el cisco de café, pero descomponiéndose a una temperatura de 640°C, mientras que el cisco de café tiene el menor flujo de calor y se mantiene constante desde la temperatura 505°C hasta 740°C y se descompone a una temperatura de 770°C.

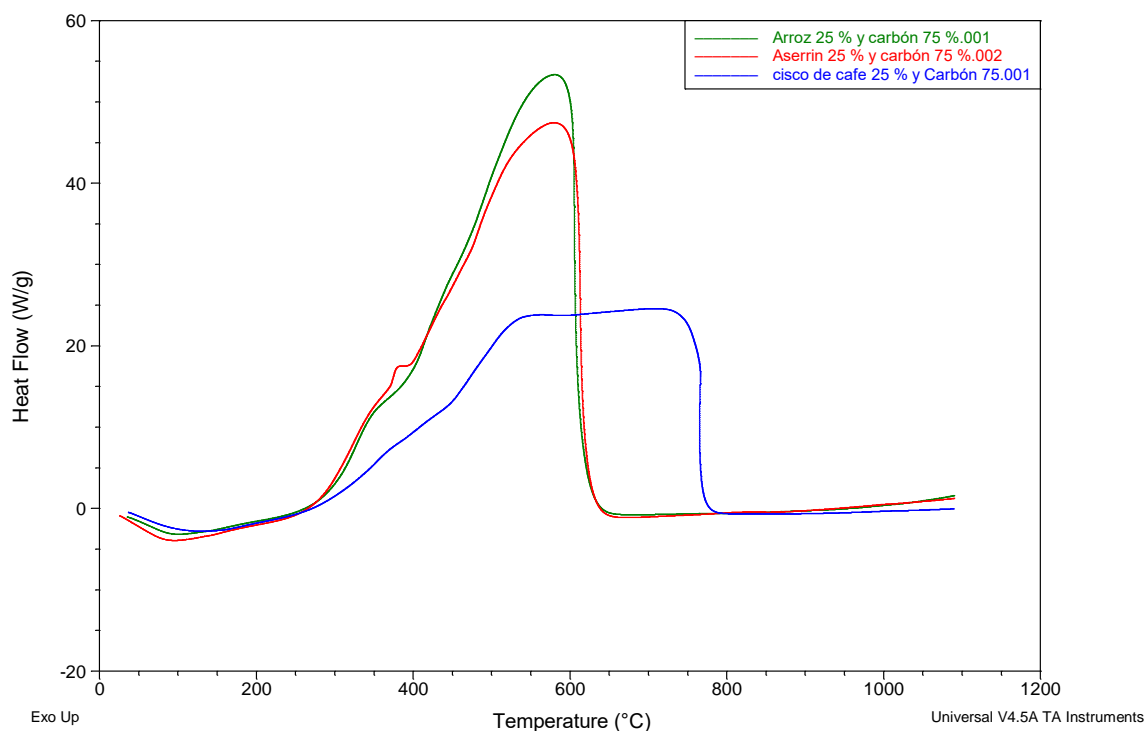


Figura 43 Gráficas de DSC de las mezclas 25% biomasa-75% carbón

Se puede observar en la gráfica 44, los resultados de la Calorimetría diferencial de barrido, DSC de las mezclas de biomasa de 50% y 50% de carbón que a los 105°C se produce la primera etapa en la cual requiere calor para el secado por lo tanto es un proceso endotermico, en la segunda etapa de asorcion de oxigeno a 260° C empieza ganar flujo de calor lo cual es un prceso exotermico, ademas se observa que la cascarrilla de arroz tiene un desprendimiento de calor mayor que las otras dos muestras pero se descompone mas rapido a una temperatura final de 600°C.

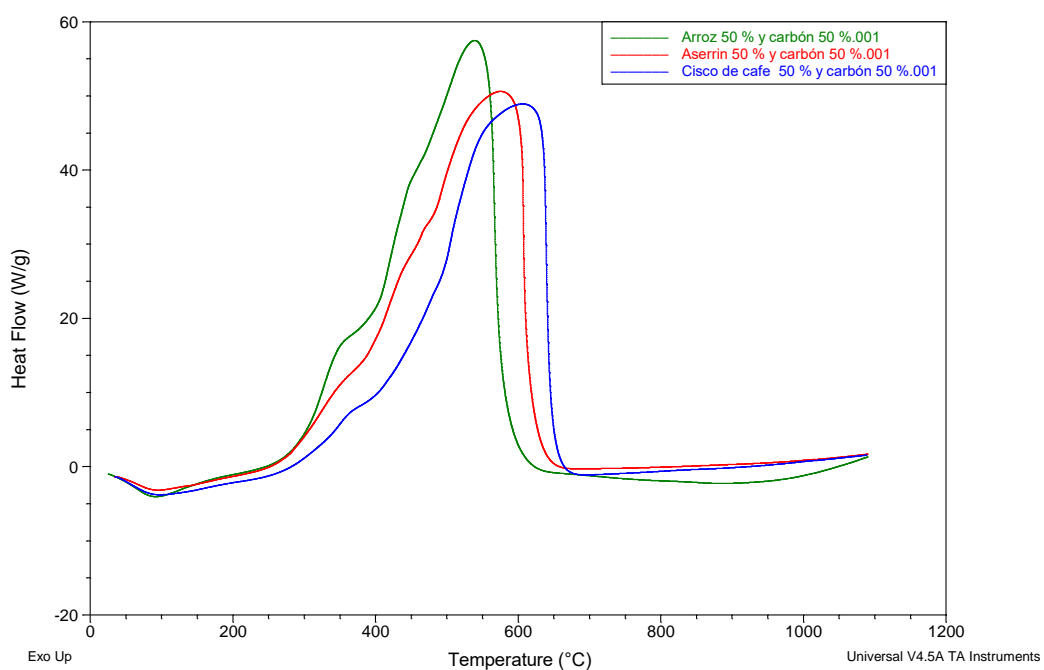


Figura 44 Gráficas de DSC de las mezclas 50% biomasa-50% carbón

En la figura 45 se presentan los resultados de la Calorimetría diferencial de barrido, DSC de las mezclas de biomasa de 75% y 25% de carbón se observa en la primera etapa que requiere de calor a una temperatura de 100°C siendo un proceso endotermico, luego empieza a ganar flujo de calor en su segunda etapa de adsorción de oxígeno, continua liberando un gran flujo de calor demostrando varios picos debido a los componentes de las mezclas, en este porcentaje de mezclas el aserrin es el que libera mayor flujo de calor pero se descompone a una temperatura de 570°C que la del cisco de café.

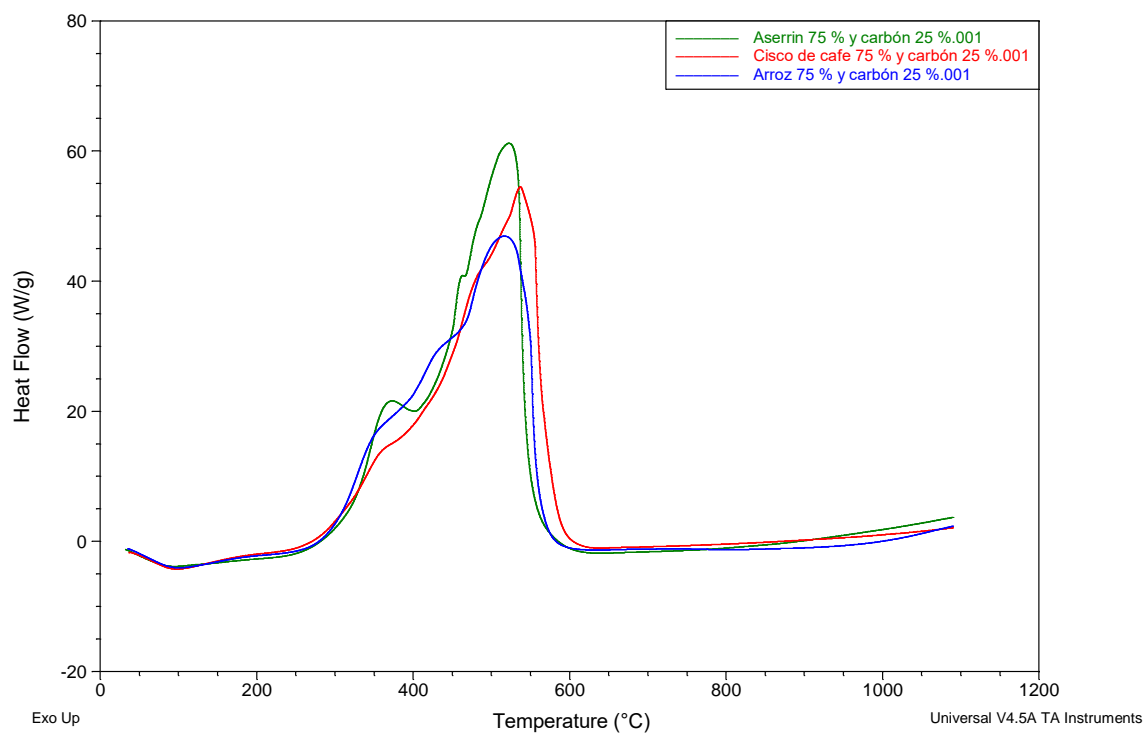


Figura 45 Gráficas de DSC de las mezclas 75% biomasa-25% carbón

7.1.1. Mejores alternativas de mezclas de biomasa con carbón en los análisis Termo Gravimétrico, TGA y Calorimetría diferencial de barrido, DSC

Luego de evaluar el comportamiento de las mezclas de carbón con las biomásas, se selecciono la alternativa con mejor comportamiento, con 25% de cisco de café - 75% de carbón, el 50% de aserrin - 50% carbón y 25% de cascarrilla de arroz - 75% carbón.

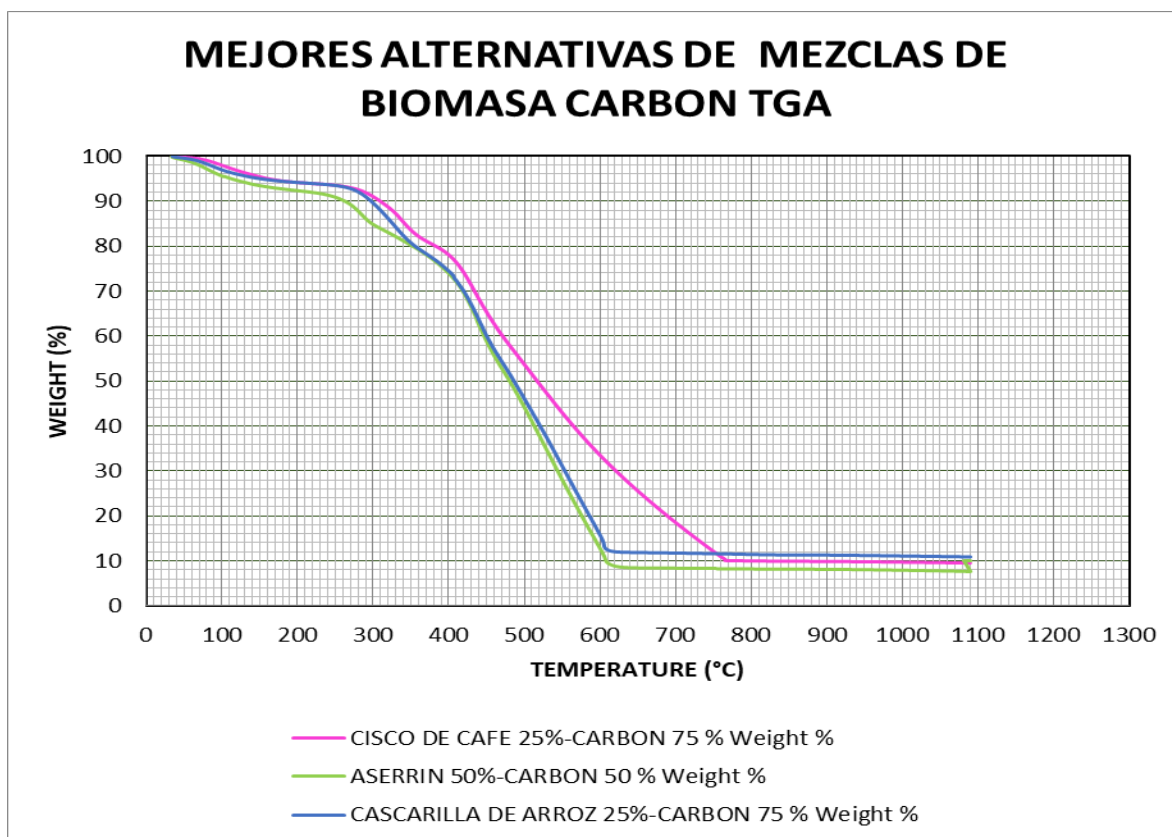


Figura 46 Gráfica TGA mejor alternativa de mezcla de biomasa carbón

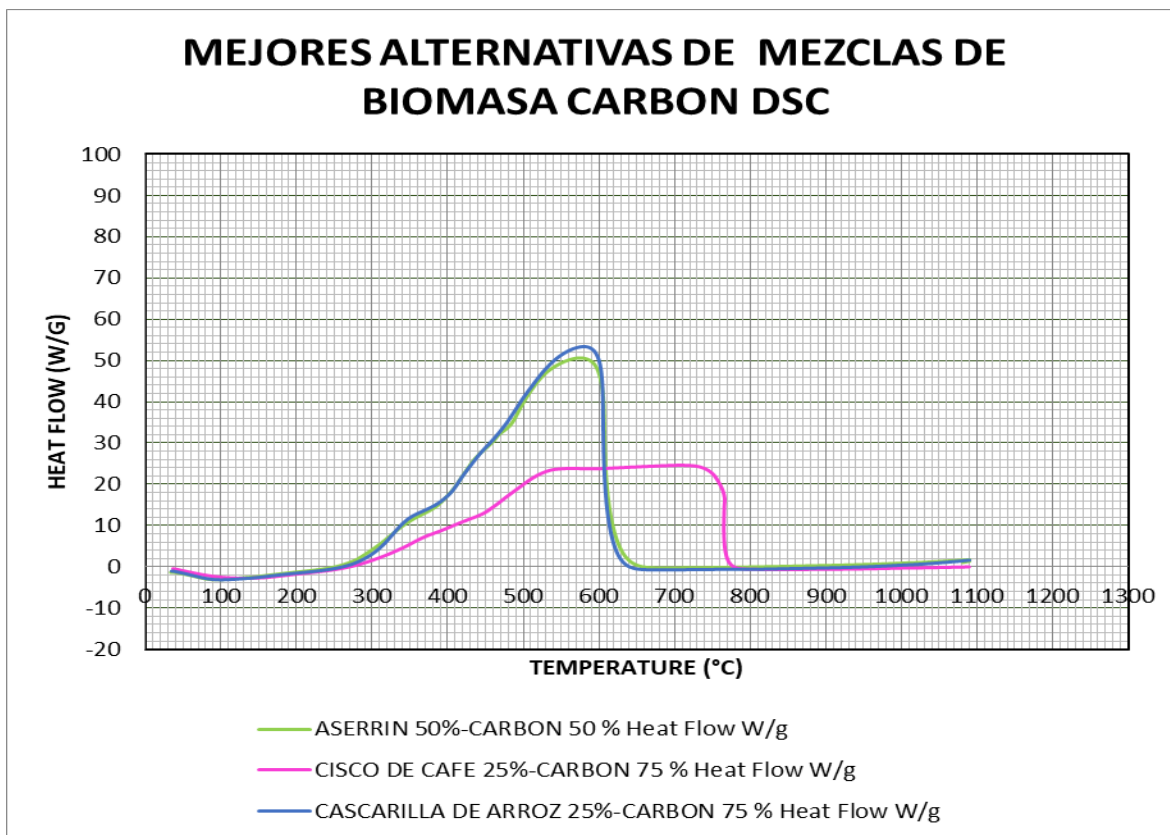


Figura 47 Gráfica DSC mejor alternativa de mezcla de biomasa carbón

En el comparativo de las mezclas de biomasa y carbón de las figuras 46 y 47, se observa que las mezclas de 25% cascarilla de arroz y el 50% aserrín libera mayor flujo de calor de aproximadamente 54 (W/G) a una temperatura de 580°C, luego desciende llegando a descomponerse a una temperatura de 630°C y 650° C, sin embargo la mezcla de 25% cisco de café libera menor flujo de calor, permanece constante durante un rango mas amplio de temperatura y se descompone a una temperatura de 790°C, siendo esta con mejor comportamiento ya que la adición del cisco del café mejora la ignición del carbón, aumenta el índice de reactividad y a su vez ampliando la temperatura de descomposición.

Conclusiones

Las muestras de carbón y las biomásas como la cascarilla de arroz y cisco de café muestran bajo contenido de humedad menores al 10%, se considera ventaja ya que el poder calorífico disminuye con la humedad y en consecuencia se debe hacer un secado anterior a la combustión.

De acuerdo a los análisis próximos completos del carbón y la biomasa, la M3 y la cascarilla de arroz presentan un alto porcentaje de ceniza mayor al 10%, dificultando la producción de calor, bajando la temperatura de combustión y reduciendo la cantidad de calor, además los altos contenidos de cenizas reblandecen (viscosas) son dañinas para los hornos o parrillas porque se adhieren a estas produciendo efectos corrosivos.

Las materias volátiles ayudarán al proceso de la combustión, la muestra M2 presento mayor contenido de volátiles 44.17% y en la biomasa el cisco de café con un 75.40% siendo estas las que presenta mayor poder calorífico.

Las biomásas tienen bajo contenido de carbono fijo, mientras que carbón presenta valores más altos, al ser mezclados disminuyen el poder calorífico y el CO₂ siendo este último favorable al medio ambiente.

Las biomásas tienen muy bajo el porcentaje de azufre, la cascarilla de arroz (0.07%), el cisco de café (0.06%), y el aserrín (0,04%); comparado con el porcentaje del carbón (1,29%), por lo tanto, al implementar las biomásas protegemos el medio ambiente reduciendo el SO₂ y a su vez las lluvias ácidas.

De acuerdo a los análisis de las biomásas, la de menor poder calorífico es la cascarilla de arroz acorde a los resultados tiene 3582 Kcal/kg y se explica por el contenido de SiO₂ del 15%, además de presentar las pérdidas por ignición más bajas del 82.71 %.

Si el carbón trae caliza CaCO₃ ésta se funde a 825 °C y va a servir de fundente o sea recogerá las cenizas restantes y las transformará en escoria.

De acuerdo a los análisis del TGA y DSC las mezclas de mejor comportamiento fueron el aserrín con un 50%-50% de carbón, cascarilla de arroz 25%- 75% de carbón, cisco de café 25%-75% de carbón, indicando un aumento de reactividad y un rango mayor de temperatura con un flujo de calor constante.

De acuerdo a los resultados físicos, químicos y térmicos, se determinó que la biomasa que mejores características tiene es el cisco de café y en el carbón la M2, siendo estas muestras las que tienen un alto contenido de materia volátil, mayor poder calorífico, menor porcentaje de ceniza, bajo contenido de azufre. La temperatura de descomposición del cisco de café es de 590 °C y en la M2 del carbón su temperatura es de 700 °C, con un flujo de calor constante. La mezcla con mejor comportamiento fue la del 25% de cisco de café y 75% de carbón, de acuerdo a este resultado se encontró que se disminuye el flujo de calor, en comparación con la muestra de carbón solo, sin embargo, se observó que la adición del cisco del café mejora la ignición del carbón, aumenta el índice de reactividad y a su vez amplía la temperatura de descomposición.

Recomendaciones

De acuerdo a la caracterización realizada al carbón térmico se establece que el carbón empleado en el lecho fluidizado es apto, es importante aumentar la frecuencia de los controles para garantizar el buen comportamiento en el proceso de combustión.

Continuar con el estudio para el uso industrial de las mezclas de biomasa mediante la conformación de probetas o pellets de la mezcla seleccionada e implementarlo a nivel industrial.

El análisis petrográfico es muy útil para diferenciar entre los tipos de carbón, aspecto importante para la comercialización, ya que sus resultados permitirán establecer con certeza si un producto está compuesto por un único carbón o mezcla de carbones similares o si se trata de una mezcla de carbones diferentes de propiedades intermedias, como sucede en la comercialización de carbones medio volátil, que en muchos casos resultan ser mezclas de carbones altos y bajos volátiles, pero el comportamiento en el proceso de combustión difiere dado a las características fisicoquímicas siendo menos eficientes.

Anexos

Anexo 1. Humedades del carbón.

Anexo 2. Granulometría.

Anexo 3. Análisis Próximos.

Anexos 4. Análisis Químicos.

Anexos 5. Análisis termogravimétricos y Calorimetría diferencial de barrido

Referencias Bibliográficas

Análisis Químicos (2015) Recuperado de:

<http://www.cina.ucr.ac.cr/index.php/2015-10-28-20-54-43/analisis-quimicos>

Atlas del potencial energético de la biomasa residual en Colombia Recuperado de:

file:///G:/UPME_051_Atlas%20de%20Biomasa%20Residual%20Colombia.pdf

Baez, I. (2004). Manual de carbones y coquización. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano.

Barrera R, Pérez Juan F., Salazar C., 2014. Carbones colombianos: clasificación y caracterización termoquímica para aplicaciones energética.

Bhattacharya, S; Junfeng, L; Runqing, H; Yanquin, S; Jingli, S. & Salam A. (2005). Assessment. of sustainable energy potential of non-plantation biomass resource in china. Biomass and bioenergy 29, 167-177.

Blander, M. (2010). Calculations of the Influence of Additives on Coal Combustion Deposits.

Argonne National Laboratory.

Castells, X. (2012). Energía, agua, medioambiente, territorialidad y sostenibilidad. Barcelona:

Díaz de Santos, 2012.

Cenicafe. (2011). Valorización de productos de café. Recuperado de:

http://www.cenicafe.org/es/index.php/cultivemos_cafe/manejo_de_subproductos/valorizacion_de_los_subproductos_del_cafe.

Coordinación de Energías Renovables. (2008). Energías renovables. Recuperado de:

http://www.energia.gov.ar/contenidos/archivos/publicaciones/libro_energia_biomasa.pdf

Cutimbo, M. (2017). Estudio exploratorio del proceso de co-combustión de carbón y biomasa.

mediante análisis termogravimétrico para su aprovechamiento en la generación de calor.

Trabajo de grado. Universidad Nacional de Colombia. Colombia, Bogotá.

Cuartheador (Minería) recuperado de:

<https://glosarios.servidor-alicante.com>

De Lucas, A; Del Peso, C; Rodríguez, E. & Prieto, P. (2012). Biomosas, biocombustible y

sostenibilidad. Madrid: Centro Tecnológico Agrario y Agroalimentario.

Douglas A. (1992) “principio de análisis instrumental”.

Dugan, P. & Moran, V. (1970). “Aspects of the thermal analysis of coals in presence of air,”

Fuel, 49(4), 415–424.

- Espinal, C. & Covaleda, H. (2007). La cadena de arroz en Colombia, una mirada global de su estructura dinámica 1991-2005. Bogota: Edimundo.
- Funcia I. (2014). Predicción del comportamiento de compuestos inorgánicos en parrilla de combustión. Master universitario en dirección de proyectos. Universidad de la Rioja.
- Granados Y., 2015. Importancia De Los Ensayos TGA y DSC en el Estudio de las Propiedades Térmicas de Mezclas Asfálticas .
- Hulkkonen, CHP (1995). Generation from biomass fuels. Part 2, Biomass fuels and conversion Technologies.
- Hydrogenrich gas production in the process of steam gasification. Energy Conversion and Management.
- Jenkins M. T.R. Miles Jr. (2004). Combustion properties of biomass, fuel processing technology- Elsevier, 219-230.
- Jaurena M. (2009) “Guía de procedimientos analíticos” Recuperado de:
https://www.agro.uba.ar/sites/default/files/cisna/promefa_procedimientos
- López, D. (2013). Valorización de biomásas de origen vegetal mediante procesos térmicos y termoquímicos. Universidad de Castilla la Mancha. Mancha, España.

McKendry P. (2002). Energy production from Biomass (part 1): Overview of Biomasa fuel in china. Biomass and bioenergy 83, pp.37-46.

McKendry P.(2002) Producción de energía a partir de biomasa Recuperado de:

https://www.researchgate.net/publication/11315089_McKendry_P_Energy_production_from_biomass_Part_1_Overview_of_biomass_Bioresour_Technol_83_37-46.

Mejía, J; Convers, C. & González, J. (2006). “Análisis de Microlitotipos en los Carbones de la Formación Guaduas en el Sinclinal de Sueva Cundinamarca,” Geol. Colomb. 31(1), 11–26.

Mettler Toledo (2006) Recuperado de:

<https://www.mt.com/dam/labDiv/campaigns/cosmetics/catalogs/LabCat>

Miltner, M; Makaruk, A; Harasek, M. & Friendl A. (2006). CFD – modeling for the combustion of solid Baled Biomass. Fifth international Conference on CFD in the process industries. CSIRO, Melbourne – Australia. 13 -15.

Ministerio de Minas y Energía. (2012). Perfil del mercado del carbón. Bogota: Coordinación General de Energía.

Montilla P. (2006). Caracterización de algunas propiedades físicas de algunos factores y

conversión del café de Manizales. Trabajo de grado. Universidad de Caldas. Manizales, Colombia.

Navarta, M; Ojeda, C. & Rojas, F. (2008). “Aplicación de la Espectroscopia del Infrarrojo Medio en Química Analítica de Procesos,” 2(3), 93–103.

Prada, A. (s,f). Proceso experimental de la aglomeración de partículas en un lecho fluidizado. España: Universidad Carlos III.

Prieto, I. (s,f). Sistema de combustión en lecho fluido, centrales térmicas. Recuperado de:

http://ocw.uniovi.es/pluginfile.php/1011/mod_resource/content/1/1C_C12757_0910/04_GT13_Centrales_termicas_de_lecho_fluido.pdf

Reyes, J. (2013). Reacción asistida por microondas para la obtención de hidrocarburos a partir de aserrín de madera". Trabajo de grado. Universidad de Quito. Quito, Ecuador.

Rodríguez, W. (2010). Optimización de producción de briquetas de carbón y biomasa. Trabajo de grado. Universidad Nacional de Ingeniería. Lima, Perú.

Romero, A. (2010). “Aprovechamiento de la biomasa como fuente de energía alternativa a los combustibles fósiles”, Rev. R. Acad. Cienc.exact.Fis.Nat, 104(1), 331-345.

Romero M. (2009). Fouling control in biomass boilers, Biomass and bionergy. 854-861.

Serret, N; Giralt, G. & Quintero, M. (2016). Caracterización de aserrín de diferentes maderas.

Tecnología Química, 36(3), 1.

Sierra, J. (2009). Alternativa de aprovechamiento de la cascarilla de arroz en Colombia. Trabajo de grado. Universidad de Sucre. Sincelejo, Colombia.

Subero, E. & Pallarés, J. (2010). “Caracterización de los combustibles sólidos,” Zaragoza: Escuela Universitaria Ingeniería Técnica Industrial.

Textos Científicos. (2004). Propiedades del carbón. Recuperado de:

<https://www.textoscientificos.com/energia/combustibles/propiedades-carbon>

Universidad Politécnica de Sevilla. (s,f). Manual de carbón activo. Recuperado de:

<http://www.elaguapotable.com/Manual%20del%20carb%C3%B3n%20activo.pdf>.

Romero, A. (2010). “Aprovechamiento de la biomasa como fuente de energía alternativa a los combustibles fósiles”, Rev. R. Acad. Cienc.exact.Fis.Nat, 104(1), 331-345.

Serret, N; Giralt, G. & Quintero, M. (2016). Caracterización de aserrín de diferentes maderas. Tecnología Química, 36(3), 1.

Smoliński A. 2011 Pag, 52:37-45. Coal char reactivity as a fuel selection criterion for coal-based

Sustainable Forestry for Bioenergy & Bio-based Products (2007). Recuperado de

<http://learn.forestbioenergy.net/>.

UTEST, Recuperado de: equipo para ensayo de materiales

Textos Científicos. (2004). Propiedades del carbón. Recuperado de:

<https://www.textoscientificos.com/energia/combustibles/propiedades-carbon>