	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 TRABAJO DE GRADO

AUTOR(ES): NOMBRES Y APELLIDOS COMPLETOS

NOMBRE(S): ANDRÉS CAMILO APELLIDOS: QUINTERO GARZÓN
 NOMBRE(S): MARÍA FERNANDA APELLIDOS: SOTO RIVERO

FACULTAD: INGENIERÍAS

PLAN DE ESTUDIOS: INGENIERÍA DE MINAS

DIRECTOR:
 NOMBRE(S): GABRIEL APELLIDOS: PEÑA RODRÍGUEZ

TÍTULO DEL TRABAJO (TESIS): EVALUACIÓN ENERGÉTICA DE BRIQUETAS
 ELABORADAS A BASE DE FINOS DE COQUE Y CARBÓN PRODUCIDOS EN LA
 PLANTA DE COQUIZACIÓN INDUMAX-NORTE DE SANTANDER

RESUMEN

La presente investigación tendría como fin la elaboración de briquetas por medio de un prensado uniaxial a 20, 30 y 50 Mpa; para el diseño de mezcla del producto se llevó a cabo usando un diseño experimental 32, los factores son presión y concentración de carbón con un contenido de humectación constante, el cual será de 7% del peso total de la mezcla. Los análisis próximos, azufre e índice de hinchamiento libre reportan que el fino de coque tiene menor poder calorífico en comparación con los finos de carbón, así mismo con el contenido de materia volátil, por el contrario, con las cenizas que presenta mayor a las de los finos de carbón.

Aunado a lo anterior, se obtuvo como resultado que el agua es un buen aglutinante en la medida que la conservación y unificación de partículas en reacción con el coque permite mejorar la combustión y aumenta su poder calorífico, ahora, si se mezcla con otros aglutinantes su poder calorífico aumenta de forma exponencial.

PALABRAS CLAVE: aglutinante, briqueta, finos de carbón, finos de coque, presión

CARACTERÍSTICAS:

PÁGINAS 75 TABLAS 14 FIGURAS 27 CD ROOM 1

EVALUACIÓN ENERGÉTICA DE BRIQUETAS ELABORADAS A BASE DE FINOS
DE COQUE Y CARBÓN PRODUCIDOS EN LA PLANTA DE COQUIZACIÓN INDUMAX-
NORTE DE SANTANDER

ANDRÉS CAMILO QUINTERO GARZÓN

MARÍA FERNANDA SOTO RIVERO

UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER

FACULTAD DE INGENIERÍAS

PLAN DE ESTUDIOS DE INGENIERÍA DE MINAS

SAN JOSÉ DE CÚCUTA

2021

EVALUACIÓN ENERGÉTICA DE BRIQUETAS ELABORADAS A BASE DE FINOS
DE COQUE Y CARBÓN PRODUCIDOS EN LA PLANTA DE COQUIZACIÓN INDUMAX-
NORTE DE SANTANDER

ANDRÉS CAMILO QUINTERO GARZÓN

MARÍA FERNANDA SOTO RIVERO

Trabajo de grado presentado como requisito para optar el título de
Ingeniero de Minas

Director

GABRIEL PEÑA RODRÍGUEZ

Doctor en Ingeniería de Materiales

Codirector

FREDDY ALEXIS RINCÓN GUTIÉRREZ

Ingeniero Civil

UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER

FACULTAD DE INGENIERÍAS

PLAN DE ESTUDIOS DE INGENIERÍA DE MINAS

SAN JOSÉ DE CÚCUTA

2021

ACTA DE SUSTENTACION DE UN TRABAJO DE GRADO

FECHA. Cúcuta, 10 de septiembre de 2021

HORA: 2:00 p.m.

LUGAR: TICS MEET

PLAN DE ESTUDIOS: INGENIERIA DE MINAS

TITULO DE LA TESIS: "EVALUACION ENERGETICA DE BRIQUETAS ELABORADAS A BASE DE FINOS DE COQUE Y CARBON PRODUCIDOS EN LA PLANTA DE COQUIZACION INDUMAX - NORTE DE SANTANDER"

JURADOS: Ing. DUVIN SMITH BLANCO MENESES
Ing. PEDRO PABLO TORRES MEDINA
Lic. ALBERTO SARMIENTO CASTRO

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

DIRECTOR: Dr. GABRIEL PEÑA RODRIGUEZ

COORDIRECTOR: Ing. FREDY ALEXIS RINCON

NOMBRE DE LOS ESTUDIANTE	CODIGO	NUMERO	CALIFICACIÓN	(A) (M) (L)
			LETRA	
MARIA FERNANDA SOTO.	1181043	4.6	CUATRO, SEIS	MERITORIA
ANDRES CAMILO QUINTERO.	1180900	4.6	CUATRO, SEIS	MERITORIA

OBSERVACIONES:

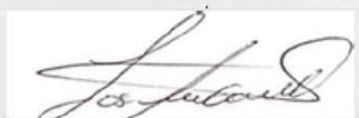
FIRMA DE LOS JURADOS:


cc: 4110901.





Vº. Bº.


COORDINADOR COMITÉ CURRICULAR

Dedico este trabajo de grado inicialmente a Dios, que es mi guía y fortaleza ante cualquier adversidad, a mi madre Carmen Cecilia Garzón Ruiz, que es la mujer que me ha apoyado ante cualquier eventualidad de mi vida y me ha ofrecido su mano sin nada a cambio, tu bendición a diario a lo largo de mi vida me protege y me lleva por el camino del bien, a mi hermana Dianni Huliana Quintero Garzón por estar presente en cada paso de mi vida. Gracias.

ANDRÉS CAMILO QUINTERO GARZÓN

Dedico este trabajo de grado principalmente a mi madre Maritza Josefina Rivero de Soto y mi hermana Maritza Elena Soto Rivero, que han sido el motor de mi vida y el pilar más importante, las que siempre me apoyan en cualquier paso de mi vida. A mi padre Enrique Soto Angarita por estar presente en cada paso de mi vida, y finalmente a mis mejores amigos, David Forgiony, Kleiman Angulo, Lorena Carreño y Sebastián Vargas, que son mi equipo y sin ellos, no se fuera podido lograr esta meta por todo el apoyo dado. A todos, los quiero, por ustedes y para ustedes.

MARÍA FERNANDA SOTO RIVERO

Agradecimientos

Los autores agradecen a las personas y empresas que contribuyeron a la realización de este trabajo de grado:

A la empresa Carbomax de Colombia S.A.S., y en especial a Homero Gómez Anaya y Franklin Zarate, por la oportunidad brindada para la ejecución de este proyecto y dejarnos crecer profesionalmente y aprender conocimientos nuevos en la empresa, así mismo, por la financiación a través del proyecto de investigación “Evaluación energética de briquetas elaboradas a base de finos de coque y carbón producidos en la planta de coquización Indumax-Norte de Santander” como por la infraestructura para el desarrollo, experimentación y caracterización de carbones y coque.

Al Laboratorio de la planta Indumax de Colombia S.A.S, en especial a la líder del laboratorio Erika Leonor Sierra Balcácer, por su enseñanza y apoyo permanente en el desarrollo de este trabajo. Al Grupo de Investigación en Procesos y Minerales Avanzados “GIPROMAX”, por brindarnos la oportunidad de conocer la investigación de una forma más excepcional y extraordinaria, gracias por las gestiones.

Al Grupo de Investigación en Instrumentación y Física de la Materia Condensada “GIFIMAC”, por brindarnos conocimientos aplicados en el sector minero energético y todo apoyo con el proyecto de grado.

Y finalmente, al Doctor Gabriel Peña Rodríguez, por ofrecernos su tiempo y dedicación para dirigir nuestra tesis, como también, por toda la disposición y colaboración que nos brindó.

Contenido

	pág.
Introducción	15
1. El Problema	17
1.1 Título	17
1.2 Planteamiento De Problema	17
1.3 Formulación Del Problema	18
1.4 Objetivos	18
1.4.1 Objetivo General	18
1.4.2 Objetivos Específicos	18
1.5 Justificación	18
2. Marco Referencial	20
2.1 Antecedentes bibliográficos	20
2.1.1 Antecedentes Internacionales	20
2.1.1 Antecedentes Nacionales	21
2.2 Marco Teórico	22
2.2.1 El Carbón	22
2.2.2 Clasificación De Los Carbones Por Rango	22
2.2.3 El Coque	23
2.2.3.1 Coquización	23
2.2.3.2 Cribado	24
2.2.4 Briqueteado	24
2.2.4.1 Composición De Las Briquetas	24

2.2.4.2 Fabricación De Briquetas	24
2.2.4.3 Uso De Las Briquetas	25
2.2.5 Análisis.	25
2.2.5.1 Análisis Próximos.	25
2.2.5.2 Análisis Elementales	28
2.2.5.3 Análisis Especiales	29
2.3 Marco Conceptual	32
2.4 Marco Contextual	32
2.5 Marco Legal	33
3. Diseño Metodológico	35
3.1 Tipo De Investigación	35
3.2 Etapas De La Investigación	35
3.2.1 Primera Etapa – Obtención Y Caracterización De Finos De Coque Y Carbón	35
3.2.2 Segunda Etapa - Elaboración De Las Briquetas O Muestras	35
3.2.3 Tercera Etapa – Caracterización De Las Muestras	36
3.3 Universo Y Muestra	38
3.4 Técnicas De Análisis De Procesos De Datos	38
3.5 Presentación De Resultados	38
4. Materiales Y Métodos	39
4.1 Recolección De Material	39
4.2 Distribución De Tamaños De Partículas	41
4.3 Elaboración De Briquetas	43
4.4 Análisis Físicos – Químicos De La Briqueta	46

4.4.1 Análisis Próximos + FSI	46
4.4.2 Análisis Elementales	47
4.4.3 Propiedades Térmicas De Las Briquetas	48
5. Discusiones Y Análisis De Los Resultados	51
5.1 Caracterización De La Materia Prima	51
5.2 Distribución De Tamaños	53
5.3 Elaboración De Briquetas	55
5.4 Evaluación De Briquetas Obtenidas	58
5.4.1 Modelo De Briquetas Basados En Diseño Experimental 32	58
5.4.2 Ensayo De Resistencia A La Compresión Inconfinada	61
5.4.3 Poder Calorífico	62
5.4.4 Propiedades Térmicas De Las Briquetas	63
6. Conclusiones	66
7. Recomendaciones	68
Bibliografía	69

Lista De Tablas

	pág.
Tabla 1. Clasificación por rango	23
Tabla 2. Rango de materia volátil	23
Tabla 3. Rangos de carbono, hidrógeno y oxígeno	28
Tabla 4. Análisis del carbón	33
Tabla 5. Tratamientos de la configuración estándar del diseño 32	36
Tabla 6. Mezclas	43
Tabla 7. Caracterización de los finos	51
Tabla 8. Clasificación granulométrica de los finos de coque y carbón	53
Tabla 9. Resultados de mezclas	57
Tabla 10. Resultado del diseño experimental 32	58
Tabla 11. Resumen del modelo	59
Tabla 12. Resistencia a la compresión	61
Tabla 13. Poder calorífico	63
Tabla 14. Propiedades térmicas a temperatura ambiente de las briquetas	65

Lista De Figuras

	pág.
Figura 1. Proceso de briqueteado	24
Figura 2. Procedimiento para medir el poder calorífico	31
Figura 3. Gráfica de FSI según la norma	31
Figura 4. Diagrama de flujo del proceso de evaluación energética de briquetas	37
Figura 5. Ubicación de planta Indumax	39
Figura 6. Muestreo de coque	40
Figura 7. Muestreo y almacenamiento de la muestra	40
Figura 8. Cuarteo y peso de muestras	41
Figura 9. Pulverizado de finos	41
Figura 10. Tamizado	42
Figura 11. Mezclas	44
Figura 12. Moldes cilíndricos	44
Figura 13. Proceso de compactación	45
Figura 14. Briquetas secadas a temperatura ambiente	45
Figura 15. Embalaje de las briquetas	46
Figura 16. Ensayo a la compresión inconfiada	47
Figura 17. Ensayo a la compresión inconfiada	48
Figura 18. Sensor dual SH-1 del sistema KD2 Pro y diagrama teoría flujo lineal transitorio de calor	49
Figura 19. Curva granulométrica del coque y carbón	54
Figura 20. Tamaño de partícula por malla de los finos	55

Figura 21. Efecto del fino de coque sobre poder calorífico superior	58
Figura 22. Diagrama de Pareto para factor A y factor B	60
Figura 23. Gráfica de interacción para resistencia (KN)	60
Figura 24. Grado de optimización	61
Figura 25. Resistencia a la compresión inconfiada vs presión de compactación	62
Figura 26. Gráfica de interacción para poder calorífico (BTU)	63
Figura 27. Datos del DSC - TGA del fino de carbón	64

Resumen

Se reporta la evaluación energética de briquetas realizadas a base de finos de coque y carbón para tres mezclas en porcentaje en peso (90-10%), (80-20%) y (70-30%) donde la fase mayoritaria fue el coque producido en la planta de coquización Indumax- Norte de Santander.

Las briquetas fueron elaboradas por prensado uniaxial a 20, 30 y 50 Mpa, para el diseño de mezcla del producto se llevó a cabo usando un diseño experimental 32, los factores son presión y concentración de carbón con un contenido de humectación constante, el cual será de 7% del peso total de la mezcla. Los análisis próximos, azufre e índice de hinchamiento libre reportan que el fino de coque tiene menor poder calorífico en comparación con los finos de carbón, así mismo con el contenido de materia volátil, por el contrario, con las cenizas que presenta mayor a las de los finos de carbón.

Los resultados que reportaron las briquetas fue que a medida que el contenido de carbón incrementa, las cenizas presentes en las muestras disminuyen, y aumenta su materia volátil y poder calorífico, por otra parte, se evidenció que mayor presión de compactación las briquetas tendrán una resistencia elevada a las de menor presión. Los valores de la resistencia y poder calorífico, de igual manera con las propiedades térmicas de las briquetas hallados en este trabajo de los prototipos de briquetas son muy importantes para determinar su uso como combustible para la generación de energía en la industria.

Aunado a lo anterior, se obtuvo como resultado que el agua es un buen aglutinante en la medida que la conservación y unificación de partículas en reacción con el coque permite mejorar la combustión y aumenta su poder calórico, ahora, si se mezcla con otros aglutinantes su poder calorífico aumenta de forma exponencial.

Palabras clave: aglutinante, briqueta, finos de carbón, finos de coque, presión.

Introducción

La industria de coque y carbón en Colombia ha exportado alrededor de 74,69 millones de toneladas de carbón a nivel mundial en el año 2019, este sector aporta contribuciones para el desarrollo del país, el primer trimestre del 2.020 se dispuso \$338.872,07 millones de pesos y en el año 2019 realizó un aporte de \$1,95 billones al Sistema General de Regalías, que destinaron los municipios en proyectos de educación, salud, infraestructura y transporte con el fin de mejorar la calidad de vida de los colombianos.

En Norte de Santander en el primer trimestre del 2.020 se dispuso de \$1.541,19 millones de pesos para el beneficio de la población y en obras públicas. (UPME, 2020). En el proceso de fabricación de coque, se contemplan tres etapas, una de precalentamiento de la roca de 350 a 550°C aumentando la velocidad del desprendimiento de los gases como el O₂, C, e H. (Balaguera, 2014). La segunda, de 550 a 700°C donde alcanza su mayor fluidez convirtiéndose en semicoque, y la última de 700 hasta 1300°C transformándose en coque (Rodríguez I. B., 2013), posteriormente se somete a apagado con agua, y llevado al proceso de cribado donde se separa por tamaños dando como resultado tamaño de partículas de coque que oscilan entre 50x150mm hasta menores de 5mm, estas dimensiones pequeñas dan lugar al material llamado finos de coque. (Camacho, 2015).

Estos finos de coque en las plantas de coquización cada día se van acumulando, ocupando espacios que puede ser de uso vital para otras labores, afectando la salud del trabajador y población aledaña por la alta dispersión de material particulado y aportando negativamente al medio ambiente por la alteración de los suelos y así mismo al crecimiento de las plantas, se debe tener en cuenta que, estas partículas representan aproximadamente el 17% de la producción, en el año 2019, Colombia produjo un total de 3,1 millones de toneladas de coque (UPME, 2020), de las cuales aproximadamente 155.000 toneladas serian de finos de coque, cabe destacar que este material

posee un valor comercial bajo, y genera costos adicionales a la industria, lo que ocasiona pérdidas en sus operaciones financieras (Camacho, 2015).

Por lo anterior, se propone conformar y caracterizar briquetas a base de finos de coque y carbón producidos en la planta de coquización INDUMAX, Norte de Santander, con el fin de dar valor agregado a éstos mediante la reutilización de finos de carbón y coque producidos en las plantas coquizadoras, evaluando su capacidad energética y generando un producto (briqueta) que pueda ser utilizado en diferentes procesos industriales, aumentando la rentabilidad para la empresa coquizadora y así mismo a la región.

1. El Problema

1.1 Título

Evaluación energética de briquetas elaboradas a base de finos de coque y carbón producidos en la planta de coquización Indumax - Norte de Santander.

1.2 Planteamiento De Problema

El coque es un producto sólido, poroso de color gris metálico con alta resistencia mecánica que se fabrica mediante la destilación a elevadas temperaturas de mezclas de carbones coquizables (Rodríguez I. B., 2013), descomponiendo la materia volátil, enriqueciéndose en carbono fijo. Una vez producido el coque en el horno, y realizado el apagado, se lleva al proceso de cribado, en el cual se clasifican por tamaños según los requerimientos de los compradores (Camacho, 2015), entre estos tamaños oscilan desde 50x150mm hasta <10mm, estas partículas se denominan finos de coque.

En el fondo de las cribadoras, se acumulan los finos de coque, los cuales se almacenan en patios de las coquizadora ocupando espacios, lo que generan una disminución en las labores operativas en las plantas de coquización, aportando negativamente al medio ambiente ya que al tener esos finos acopiados ocasionan suelos infértiles lo que produce una afectación en el crecimiento de las plantas, afectación a la salud y seguridad de la comunidad aledaña a la planta, generando un posible costo adicional a las empresas por pagos en indemnizaciones y riesgos laborales a demás es preciso tener en cuenta que estos finos de coque poseen un precio bajo en el mercado debido a su baja demanda ocasionada por disminución de su poder calorífico.

Por lo anterior, se pretende elaborar briquetas a base de finos de coque y carbón producidos en la planta de coquización INDUMAX- Norte de Santander usando prensado uniaxial, de forma tal que pueda ser reutilizado en el proceso de coquización, o en la producción de briquetas con

valor agregado al incrementar su poder calorífico y que pueda sea empleado en diversos procesos industriales.

1.3 Formulación Del Problema

¿Al evaluar la eficiencia energética de las briquetas producidas por planta Indumax, permitiría la utilización de los finos de coque y carbón para la creación de un producto (briqueta) y aumentar su uso en las empresas coquizadora regionales?

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo General. Evaluar la eficiencia energética de briquetas conformadas por prensado uniaxial a base de finos de coque para concentraciones de finos de carbón en un rango entre el 10% y el 30% en peso, y para presiones de compactación entre 20 y 50 MPa, con una humectación constante para la utilización y producción de la empresa coquizadora.

1.4.2 Objetivos Específicos. Caracterizar los finos de coque y carbón producidos en la planta de coquización Indumax- Norte de Santander, durante el proceso de coquización.

Elaborar briquetas por prensado uniaxial a base de finos de coque y carbón, mediante un diseño experimental de dos factores y tres niveles, para una humectación constante, tomando como respuesta el poder calorífico.

Evaluar las propiedades mecánicas a compresión y las propiedades térmicas a temperaturas ambiente de las briquetas a base de finos de coque y carbón elaboradas por prensado uniaxial, que tengan el mayor poder calorífico.

1.5 Justificación

Los finos de carbón son producidos desde el inicio del proceso de coquización, los cuales son almacenados al igual que los finos de coque en pilas ubicadas en los patios de acopio en las coquizadoras, los cuales debido a su baja demanda y poder calorífico generan unas problemáticas

a las empresas de coquización como en la afectación en la salud y seguridad del trabajador y de las comunidades aledañas, además de que los patios de acopio son ocupados por un subproducto que tiene baja demanda en el mercado nacional e internacional, por otro lado, aportan negativamente al medio ambiente, convirtiendo los suelos infértiles lo que ocasiona una afectación en el crecimiento de la vegetación. En los últimos años se han desarrollado investigaciones en diferentes partes del mundo para darle solución esta problemática y usar este subproducto, por el cual se tienen como resultados datos y experiencias en usos representativos en diversos procesos industriales (Camacho, 2015).

Actualmente la planta coquizadora INDUMAX tiene almacenado grandes volúmenes de finos de coque y al crear este nuevo producto trae beneficios como la evacuación de estos patios de acopio lo que aumentará las operaciones en la planta, disminución en las enfermedades laborales por la dispersión de material particulado lo que generará una reducción en los costos por pagos de riesgos laborales e indemnizaciones, así mismo, aportará positivamente al medio ambiente y dará valor agregado a estos finos de coque y carbón debido a la reutilización de estos se creará un nuevo producto (briqueta) que tendrá diferentes usos en procesos industriales, lo que aportará rentabilidad a la empresa y región.

2. Marco Referencial

2.1 Antecedentes bibliográficos

2.1.1 Antecedentes Internacionales. Loginov, Yu. N. (2017). The properties of coke breeze briquettes produced by ram briquetting. Trabajaron el prensado de cilindros de coque para hacer experimentos sobre la compactación del vidrio líquido con finos de coque, se tomaron porcentajes de 5, 7.5 y 10 de vidrio líquido como aglutinantes, los análisis dieron que entre más porcentaje de aglutinantes menor resistencia y si el contenido es bajo mayor presión en la máquina, es conveniente un porcentaje de 7.5 y una presión de 50 Mpa. Las pruebas de compactación fueron eficientes para el diseño de briquetas y equipos para la producción.

Eatough, C. N. (1999). The clean production of coke from waste carbonaceous fines offers an alternative to conventional coke production. El proceso de la fabricación de briquetas a partir de polvo de coque, polvo de carbón y un aglutinante mezclando en diferentes cantidades fue estudiado. Las mezclas se elaboraron en caliente, por medio de un pirolizador que va compactando la mezcla, disminuyendo las emisiones de gases, aportando a la producción limpia de briquetas.

Masgutov, I. I., Strakhov, V. M., Anikin, A. E., & Surovtseva, I. V. (2013). Increasing the Strength of Briquets Produced from Coke Fines. La fabricación de briquetas a partir de finos de coque, carbón y aglutinantes, mediante un proceso de trituración y molienda con tamaños de 1-3mm, los cuales se homogenizaron para la preparación de las briquetas, con mezclas en proporción 1:1 entre finos de coque y de carbón con una granulometría aproximada de 1 mm, y aglutinante con 8% de humedad. Una vez elaborada las muestras, estas reportaron un incremento a la abrasión, así como a la resistencia mecánica.

Machado, A. D. S., Mexias, A. S., Vilela, A. C., & Osorio, E. (2013). Study of coal, char and coke fines structures and their proportions in the off-gas blast furnace samples by X-ray diffraction.

En este estudio los autores hacen la investigación con cuatro muestras, dos con finos y dos aplicando carbón, se reporta la estructura de los carbones en crudo para elaborar las mezclas. Las muestras de finos presentaron tamaños de partículas menores de 63 μm , siendo eficientes para evaluar el proceso (PCI) aumentando el rendimiento en los altos hornos.

Gavel, D. J. (2017). A review on nut coke utilization in the ironmaking blast furnaces. En los altos hornos se utiliza el coque normal que oscila entre los tamaños 40-80mm, el coque de nuez es menor a 40mm. En este estudio se evalúa la utilización del coque de nuez donde presenta mayor permeabilidad al gas cargándolo con materiales ferrosos, la eficiencia de coque de nuez depende de su calidad.

C Sarkar. (2018). Utilization of coke fines in sintering of iron ore with higher microfines. Este estudio se hizo con finos de coque menor a 1 mm, donde fueron mezclados con polvo de coque (0,2 mm), reportándose un incremento en la velocidad de sinterización de las muestras para esta granulometría.

2.1.1 Antecedentes Nacionales. Durango Padilla, Elias Ricardo. (2016). Caracterización y evaluación energética de biocombustibles sólidos elaborados a partir de biomasa agroindustrial y carbón mineral del departamento de córdoba. En esta investigación se realizó el rendimiento energético de combustibles sólidos, se elaboraron las muestras a base de biomasa residual agroindustrial los cuales fueron coco, algodón y carbón, se utilizaron aglutinantes de maíz, yuca y plátano.

Los resultados de poder calorífico que presentaron la mezcla de coco y algodón fueron 16,77 y 17,79 MJ/Kg, es decir presento una energía alta en comparación a la biomasa original, por otro lado, la muestra de biomasa y carbón presento una mayor durabilidad a diferencia de las demás.

Sánchez Valencia, Lina Marcela. (2016). Obtención de briquetas a partir de finos de un carbón del valle del cauca. La fabricación de briquetas se realizó con el material (finos de carbón) procedente de la empresa cartón de Colombia, en el cual se mezclaron con almidón utilizado como aglutinante, así mismo se elaboraron a diferentes concentraciones, estas pasaron por un proceso de sinterización para aumentar sus propiedades mecánicas, sin embargo, la muestra con mayor resistencia fue la del contenido de almidón mayor, de igual manera la presión de comparación, por el contrario, la humectación que fue la menor, para concluir, la muestra de almidón al 20%, agua 20% y una presión de 4000 psi, presento un aumento representativo en comparación a las demás de poder calorífico.

2.2 Marco Teórico

2.2.1 El carbón. El carbón es una roca sedimentaria de origen vegetal compuesta por carbono, hidrógeno y oxígeno, producto de la descomposición, sedimentación, compactación, endurecimiento y alteración química de plantas prehistóricas por procesos geológicos naturales. El sistema de clasificación más utilizado es el propuesto por la ASTM donde los carbones se clasifican por rango (ASTM D-388), en cuatro clases: lignitos, subbituminosos, bituminosos y antracíticos, siendo este el orden en que incrementa el grado de metamorfismo. (Castro, 2011)

2.2.2 Clasificación De Los Carbones Por Rango. En la tabla 1, se presenta la clasificación americana de carbones según la norma A.S.T.M. D 388, en la que agrupa los carbones según su rango, estos dado por su carbono fijo, materia volátil y poder calorífico, es decir entre mayor sea el carbono fijo será una roca de mejor calidad, al igual con el poder calorífico, al contrario, con la materia volátil (ver tabla 2), por esta razón se determina el tipo de material.

Tabla 1. Clasificación por rango

CLASE	GRUPO	CARBONO FIJO %		MATERIA VOLÁTIL %		PODER CALORIFICO Cal / g.		CARÁCTER AGLOMERANTE
		≥	<	≥	<	≥	<	
I. ANTRACITA	1. Meta – Antracita	98	--	--	2	--	--	AGLOMERANTE
	2. Antracita	92	98	2	8			
	3. Semi – Antracita	86	92	8	14			
II. BITUMINOSO	1. Bituminoso Bajo Volátil	78	86	14	22			COMUNMENTE AGLOMERANTE
	2. Bituminoso Medio Volátil	69	78	22	31			
	3. Bituminoso Alto Volátil A		69	31		7780	7780	
	4. Bituminoso Alto Volátil B					7220	7220	
	5. Bituminoso Alto Volátil					6380	6380	
III. SUB-BITUMINOSO						5830	6380	NO AGLOMERANTE
						5830	5830	
						5280	5280	
IV. LIGNITO						4610	4610	NO AGLOMERANTE
						3500	3500	

Fuente: Norma A.S.T.M. D 388.

Según el contenido de materias volátiles, los carbones coquizables se clasifican así:

Tabla 2. Rango de materia volátil

Tipo de carbón	% M.V	Grado Coquización
Bajo volátil	14 a 22	Bajo
Medio volátil Alto volátil	22 a 31	Mediano
	31 o más	Alto

Fuente: Cartilla de Carbones y coques.

2.2.3 El Coque. El coque metalúrgico y/o siderúrgico es un material carbonoso, macro poroso de alta resistencia mecánica, producido por la carbonización de carbones o mezclas de carbones de un rango específico (generalmente bituminosos). En la práctica, para la fabricación del coque metalúrgico se utilizan mezclas complejas que pueden incluir varios tipos de carbones en distintas proporciones. (M.A. Díez, 2001)

2.2.3.1 Coquización. En el proceso de coquización, el carbón es cargado a hornos en el que acarrea tres etapas de precalentado de la roca de 350 a 550°C aumentando la velocidad del desprendimiento de los gases como el O₂, C e H. (Balaguera, 2014). De 550 a 700°C es donde

alcanza su mayor fluidez convirtiéndose en semicoque, seguido a esto de 700 hasta 1300°C ya se solidifica transformándose en coque (Rodríguez I. B., 2013).

2.2.3.2 Cribado. En este proceso el material producido (coque) se debe separar por tamaños a través de cribas o zarandas vibratorias dando como resultado unos tamaños que oscilan entre 50x150mm hasta menores de 5mm, estas dimensiones pequeñas dan lugar a un material llamado finos de coque. (Camacho, 2015)

2.2.4 Briqueteado. El briqueteado es un proceso de aglomeración que consiste en la formación por compactación de cilindros o muestras aglomeradas mediante un prensado en frío. (Alvarez, 2019), en la figura 1, se presenta un proceso de elaboración de briquetas.

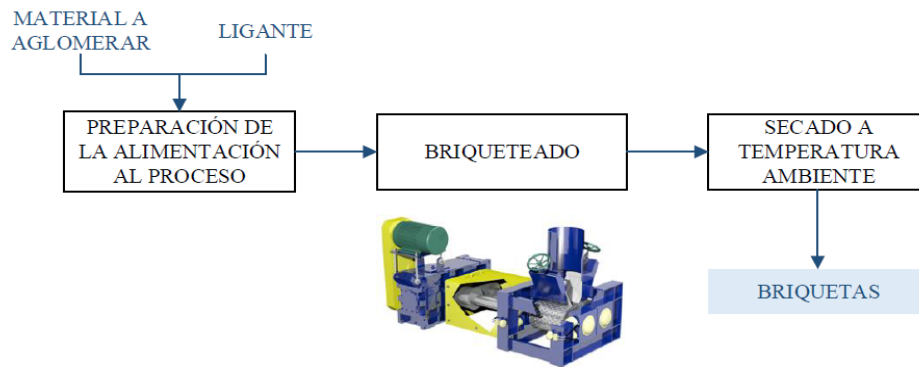


Figura 1. Proceso de briqueteado

Fuente: Feeco International.

2.2.4.1 Composición De Las Briquetas. Existen muchos tipos de briquetas, ya que puede estar fabricadas con diversos materiales compactados. La materia prima de la briqueta puede ser biomasa natural (procedente de aserraderos), biomasa residual (procedente de la industria agrícola), carbón vegetal o simplemente una mezcla de todas ellas. (Castillo, 2018)

2.2.4.2 Fabricación De Briquetas. La mezcla de finos de coque junto con los finos de carbón (tamaños menores de 5mm) prensados con humedades entre el 5 y 10% originan un producto (briqueta), la forma de esta varía según la maquinaria utilizada para compactarla,

obteniéndose muestras homogéneas con mayor energía, densidad, baja emisión al fundir en los altos hornos y alta dureza. (Camacho, 2015)

2.2.4.3 Uso De Las Briquetas. El uso de la briqueta está en función de ciertas características, debido a esto, se clasifican en dos usos, el industrial que es utilizado como combustibles para ellas mismas debido a su fácil almacenamiento y transporte. Por el contrario del uso no industrial, que se emplea para hogares como medio de calefacción y cocción de alimentos. (Chen, 2009)

2.2.5 Análisis. Para efectuar esta investigación se requiere realizar unos análisis a los componentes para la obtención de los datos los cuales son:

2.2.5.1 Análisis Próximos. Se enumeran los siguientes:

Humedad. (ASTM., 2012)

La fórmula de la humedad NORMA ASTM - D 3173 COAL es:

$$HR\% = \frac{(W - H)}{W} * 100 \quad (1)$$

Donde:

HR: Humedad residual, porcentaje en peso.

W: Peso muestra utilizada, peso en gramos

H: Peso de la muestra bruta, peso en gramos

Material volátil. (ASTM., 2012)

La fórmula de la materia volátil según NORMA ASTM - D 3175 COAL es:

$$\%M.V. = C - D \quad (2)$$

Donde:

M.V: Material volátil (%).

C: Pérdida en masa (%).

D: Humedad residual (%).

Cenizas. (ASTM., 2012)

La fórmula de la ceniza según NORMA ASTM - D 3174 COAL es:

$$\%Cenizas = \frac{A - B}{C} * 100 \quad (3)$$

Donde:

A: Peso del crisol, y cenizas (gr).

B: Peso del crisol vacío(gr).

C: Peso de la muestra para análisis (gr).

Carbono fijo. (ASTM., 2012)

La fórmula del carbono fijo según NORMA ASTM - D 3172 COAL es:

$$CF = 100\% - (\%Ceniza - \%MV - \%HR) \quad (4)$$

Donde:

CF: Carbono fijo

%Ceniza: Contenido de cenizas (valor promedio)

%MV: Contenido de material volátil (valor promedio)

%HR: % Humedad residual (valor promedio), a 105° Celsius.

Azufre. (ASTM, 2018)

La fórmula del azufre sulfato según NORMA ASTM – D4239 COAL es:

$$\%SS = \frac{((S - CS) - (B - CB)) * 13,735}{P} \quad (5)$$

Donde:

%SS: Azufre sulfato (%).

S: Peso del crisol más precipitado de BaSO4 (g)

CS: Peso del crisol de la muestra, (g)

B: Peso del crisol del blanco más blanco de sulfato, (g)

CB: Peso del crisol del blanco, (g)

P:P eso de muestra utilizada (g)

La fórmula del azufre pirítico según NORMA ASTM – D4239 COAL es:

$$\%SP = \frac{F * A * V * C * (T - B)}{M} \quad (6)$$

$$\%SP = \frac{0,0287 * (T - B)}{M} \quad (7)$$

Donde:

Sp: Azufre pirítico

F: 1,148 relación de estequiometria entre azufre y hierro en el sulfuro de hierro (FeS₂).

A: 20, Factor de dilución indicando la proporción del filtrado, para preparar la solución de ensayo.

V: 100 ml, volumen de la solución de ensayo

C: Factor de conversión de microgramos a gramos, 10⁻⁶ g/μg.

D: Concentración de hierro en el blanco en μg/ml

P: Factor adimensional, la conversión de peso fracción a porcentaje en peso.

T: Concentración de hierro en la solución problema, μg/ml

B: Concentración de hierro en el blanco μg/ml

M: Peso de muestra usada, g

La fórmula del azufre orgánico según NORMA ASTM – D4239 COAL es:

$$SO = ST - (SP - SS) \quad (8)$$

Donde:

SO: Azufre orgánico (%).

ST: Porcentaje azufre total (%).

SP: Azufre pirítico (%).

SS: Azufre sultado (%).

2.2.5.2 Análisis Elementales. (ASTM, 2012). Sirve para evaluar la composición elemental del carbón según NORMA ASTM D 3176 COAL. Los análisis que se realizan son los de Carbono e Hidrógeno, Nitrógeno y Oxígeno.

Carbono e Hidrógeno. (ASTM, 2012). El carbono se encuentra formando parte de los compuestos orgánicos y la materia mineral, el % del C crece a medida que aumenta el rango. El hidrógeno se encuentra en los compuestos aromáticos alifáticos y el H₂O presente del carbón, su % disminuye al aumentar el rango como se presenta en la tabla 3.

Tabla 3. Rangos de carbono, hidrógeno y oxígeno

TIPO DE CARBON	%H ₂	%C	%O ₂
Lignito	5-6	45-65	16-25
Carbones bituminosos	4.0-5.0	65-85	5-16
Semiantrac. Y antrac.	3.0-4.0	85-94	1.5-4.0

Fuente: Manual de carbones.

La fórmula del carbono según NORMA ASTM D 3176 COAL es:

$$\%C = \frac{\Delta \text{peso.tubo.con.KOH} * 27.289}{\text{peso.muestra}} \quad (9)$$

Donde:

%C: Carbono

Δ peso.tubo.con.KOH (gr).

27.289 factor de seguridad.

Peso de la muestra (gr).

La fórmula del hidrógeno según NORMA ASTM D 3176 COAL es:

$$\%H_2 = \frac{\Delta\text{peso.tubo.con. CaCl}_2 * 11.19}{\text{peso.muestra}} \quad (10)$$

Donde:

%H₂: Hidrógeno.

Δ peso.tubo.con. CaCl₂(gr).

11.19 Factor de seguridad.

Peso de la muestra (gr).

Nitrógeno. (ASTM, 2012). Sus concentraciones varían del 1 al 2%, es el único elemento del carbón que aparece en forma totalmente orgánica, este análisis se realiza según NORMA ASTM D 3176 COAL.

Oxígeno. (ASTM, 2012). Proviene principalmente de los compuestos orgánico su porcentaje descendiende al aumentar el rango, los carbones que han sufrido oxidación atmosférica tienen mayor O₂ que el carbón original, este análisis se realiza según NORMA ASTM D 3176 COAL.

2.2.5.3 Análisis Especiales. Se describen los siguientes:

Poder calorífico. (ASTM., 2014). El Poder Calorífico de un combustible es la cantidad de calor que puede obtenerse de un combustible cuando se quema en forma completa y sus productos son enfriados hasta la temperatura original de la mezcla aire- combustible. [Kcal/kg], [Kcal / m³]. Se determina según NORMA ASTM D 5865. En la figura 2, se observa el procedimiento para medir el parámetro. El poder calorífico bruto a volumen constante se determina por la siguiente ecuación:

$$Qv(\text{bruto}) = \frac{((t * E) - e1 - e2 - e3 - e4)}{g} \quad (11)$$

Donde:

Qv:

t: Aumento de Temperatura corregido.

E: Equivalente de energía.

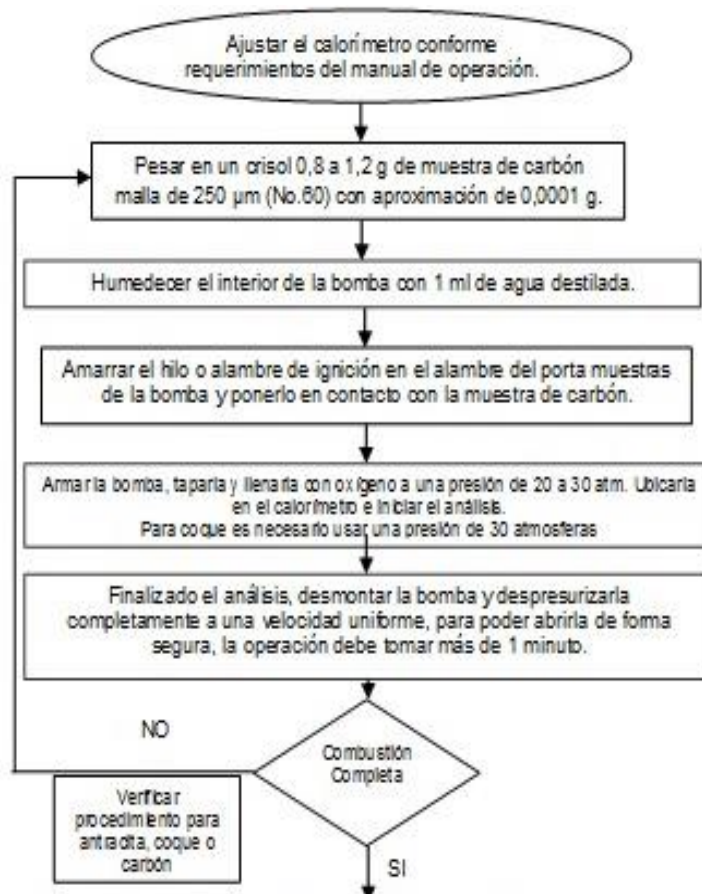
e1: Corrección para el calor de formación del HNO₃. Cada ml de solución normalizada es equivalente a 1 caloría o 1 BTU, según la solución utilizada.

e2: Corrección para el calor de combustión del alambre de ignición.

e3: Corrección para la diferencia entre los calores de formación del H₂SO₄ y el HNO₃; se usa, BTU, es 23,7 veces el porcentaje de azufre en la muestra por la masa de la muestra en gramos.

e4: Corrección por uso de ácido benzoico en J.

g: Masa de la muestra en gramos.



Continuación.



Figura 2. Procedimiento para medir el poder calorífico

Fuente: Sistema Geológico Colombiano.

Índice de hinchamiento libre. (ASTM., 2015). Se determina según NORMA ASTM D 720 por una tabla gráfica vertical donde mayor a 4,5 son carbones coquizables y por debajo son carbones térmicos (ver figura 3).

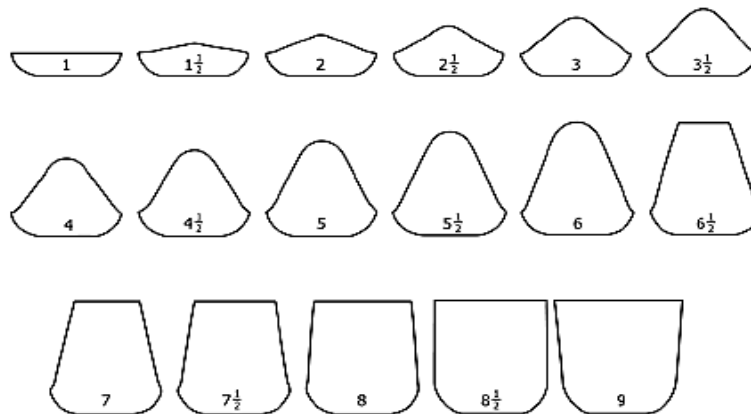


Figura 3. Gráfica de FSI según la norma

Fuente: Sistema Geológico Colombiano

2.3 Marco Conceptual

Aglutinantes: sustancia que une materiales para generar una compactación.

Alquitrán: subproducto de hulla.

Análisis próximos: análisis que se realizan en un laboratorio en el que se diagnóstica las propiedades físicas – químicas del carbón.

Brea: es una sustancia que sale del producto de la destilación de materiales.

Briqueteado: es un proceso en donde se realiza el prensado de materiales con el fin de compactarlos o unificarlos.

Carbón: roca sedimentaria de material orgánico, combustible fósil que sirve para obtención de energía.

Finos de coque: partículas de tamaños menores a 5mm de coque que no tienen ninguna utilidad económica.

Granulometría: es la medición de tamaños de un agregado.

Mezcla: material que compone dos o más sustancias unidas.

Molienda: es un proceso que permite realizar la reducción de tamaños.

Poder calorífico: es una propiedad de una materia que indica su energía.

Resistencia: es el esfuerzo que tiende a soportar un material.

Secado: reducción de la humedad de un producto.

2.4 Marco Contextual

Esta investigación se va a desarrollar en la planta de coquización Indumax, en la vereda paso de dos ríos, vía a San Faustino, Norte de Santander, donde la empresa Carbomax de Colombia S.A.S., apoyó financieramente en la ejecución del proyecto de investigación.

Reseña Histórica. La empresa Indumax de Colombia S.A.S. es una empresa colombiana, con sede principal en Cúcuta, fundada el 16 de febrero de 2016. A lo largo de estos años se ha dedicado a la fabricación de Productos Derivados de Petróleo y Carbón industrial.

En los últimos 5 años ha tenido un crecimiento exponencial convirtiéndose en la empresa líder en producción y exportación de Norte de Santander actualmente exporta diferentes productos a países como Brasil, Guatemala, India entre otros.

Misión. Somos una empresa colombiana dedicada al aprovechamiento de los recursos naturales del subsuelo, generando energía y desarrollo industrial para el mundo, aumentando las riquezas de las naciones, respetando el medio ambiente y todas las comunidades, dando valor a nuestra gente.

Visión. Para el año 2025 nuestro compromiso es convertirnos en la empresa con mayor capacidad y efectividad a nivel nacional en el proceso producción y comercialización nacional e internacional de coque metalúrgico, coque siderúrgico y coque térmico en sus diferentes especificaciones granulométricas y/o propiedades fisicoquímicas siendo reconocidos como empresa líder en el sector minero colombiano, por nuestra eficiencia, innovación y confiabilidad en el mercado de productos a base de carbón.

2.5 Marco Legal

Para la elaboración y ejecución de este anteproyecto se tendrá en cuenta, las normas American Society for Testing and Materials (A.S.T.M.) (ver tabla 4).

Tabla 4. Análisis del carbón

Prueba para determinación de:	Norma A.S.T.M.
	Carbón y Coque
Humedad	D3173
Materia volátil	D3175
Cenizas	D3174
Carbono fijo	D3172

Continuación tabla 4. Análisis del carbón

Prueba para determinación de:	Norma A.S.T.M.
	Carbón y Coque
Análisis elementales	D3176
Azufre	D4239
Poder calorífico	D5865
Índice de hinchamiento	D720
Determinación del índice de resistencia a la carga puntual	D2166

3. Diseño Metodológico

3.1 Tipo De Investigación

El trabajo de investigación es de tipo exploratorio – descriptivo con etapas de aspectos experimentales, debido a la problemática que se presenta con los finos de coque generado en el proceso productivo de coque de la planta coquizadora – Indumax, así mismo este material es de baja demanda en el mercado nacional e internacional, por esta razón se determinaron tres etapas donde tiene una línea de estudiar el material para convertirlo en un combustible sólido y de alta capacidad de energía, de igual manera en la figura 4, se presenta los procesos a realizar en el tiempo de la investigación, inicialmente es la obtención y caracterización de la materia prima, seguidamente la elaboración de las muestras siguiendo un diseño experimental y por ultima la evaluación y caracterización de las muestras que se generaron, para concluir el valor agregado que se le dan a la industria del coque.

3.2 Etapas De La Investigación

3.2.1 Primera Etapa – Obtención Y Caracterización De Finos De Coque Y Carbón.

Los finos de coque y carbón serán suministrados por la planta INDUMAX, los cuales son producidos en la operación industrial. Posteriormente se realizarán los análisis próximos, poder calorífico, índice de hinchamientos y distribución granulométrica donde se analizarán y comparar con los resultados del coque comercial.

3.2.2 Segunda Etapa - Elaboración De Las Briquetas O Muestras. La elaboración de las muestras se llevará a cabo usando el diseño experimental de dos factores y tres niveles (32), donde los factores serán la presión uniaxial de compactación, y la concentración de finos de carbón. El factor A (carga uniaxial), tendrá tres niveles 20, 30 y 50 Mpa; mientras que el factor B (concentración de finos de carbón), tendrá los niveles de 10%, 20% y 30% en porcentaje en peso,

la diferencia corresponderá a los finos de coque. En la elaboración de las briquetas se mantendrá constante el porcentaje de humectación, el cual se definirá por pruebas piloto.

En la tabla 5 se presenta la configuración estándar de los tratamientos del diseño experimental, donde la respuesta corresponde al poder calorífico (y_{ij}) de las muestras, en esta se aprecia los nueve tratamientos diferentes que corresponden a todas las posibles maneras de combinar 2 factores en tres niveles. Por otra parte, se realizarán tres replicas por cada tratamiento.

Tabla 5. Tratamientos de la configuración estándar del diseño 32

Factor A (Presión, MPa)	Factor B (concentración finos de carbón, % peso)	Respuesta (y_{ij})
(1)=20	(1)=10	y11
(1)=20	(2)=20	y12
(1)=20	(3)=30	y13
(2)=30	(1)=10	y21
(2)=30	(2)=20	y22
(2)=30	(3)=30	y23
(3)=50	(1)=10	y31
(3)=50	(2)=20	y32
(3)=50	(3)=30	y33

3.2.3 Tercera Etapa – Caracterización De Las Muestras. En esta etapa, se utilizó los materiales finos de coque y carbón, inicialmente se caracterizó estos materiales en donde se presentó que el fino de coque tiene una elevada humedad a diferencia del fino de carbón, así mismo en las cenizas, por el contrario de la materia volátil donde el carbón tuvo una relevancia negativa, por otro lado el fino de carbón tuvo mayor poder calorífico en comparación con el fino de coque, estos análisis se efectuaron con los equipos balanza analítica, estufa de secado, muflas, horno eléctrico, bomba calorimétrica, seguidamente se mezcló y homogenizó por medio de un recipiente plástico y pala las materias primas en unas concentraciones de 90, 10%; 80, 20 y 70, 30, donde el mayor porcentaje corresponde al fino de coque, de igual manera se le agrego 7% humectación en cual fue agua, estas mezclas fueron depositadas en un molde cilíndrico para hacerle la respectiva

compactación con la herramienta prensa hidráulica de 30 toneladas, luego fueron secadas dos días a temperatura ambiente y envueltas para proceder con los análisis y ensayos, por ultimo estas muestras fueron caracterizadas con los mismos equipos que se realizó la caracterización de la materias originales, adicionalmente se le realizó los ensayos a la compresión inconfiada para mirar la resistencia y las propiedades térmicas a la que mejor calidad se presentó esto se ejecutó con el equipo sensor dual sh-1 de sistema KD2 pro, para concluir se analizó con el programa, minitab donde las muestra de presión 50Mpa y 30% de concentración de finos fue la más representativas a las demás (ver figura 4).

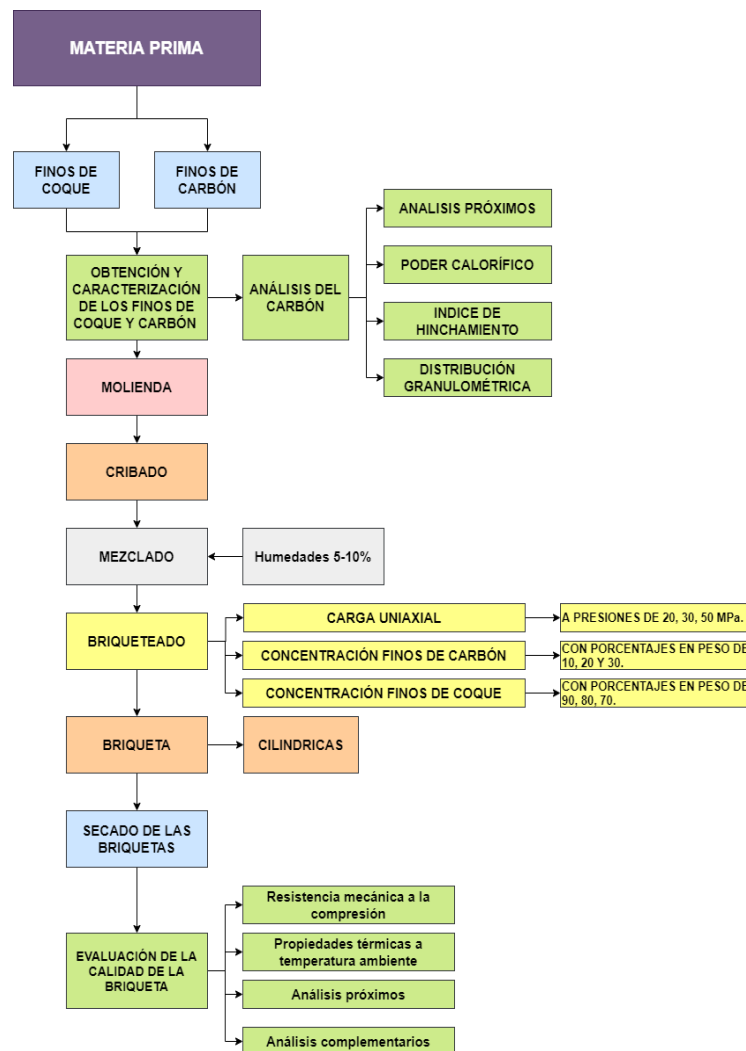


Figura 4. Diagrama de flujo del proceso de evaluación energética de briquetas

3.3 Universo Y Muestra

Se tomarán cuatro bultos de 50 kg entre finos de coque y finos de carbón, por el cual su peso total de cada fino fue de 200kg, estas materias fueron suministradas por planta coquizadora, en los cuales se homogenizarán y humectarán para la elaboración de las muestras (briquetas).

3.4 Técnicas De Análisis De Procesos De Datos

Las técnicas de análisis para los procesos de elaboración de briquetas se realizaron por etapas, donde la primera fue obtención y caracterización de las materias que se estudiaron, esto se realizó con los equipos de laboratorio, la obtención de los finos se realizó con los instrumentos de muestreo como lo son bolsas, costales, pala e identificación de muestras, de igual manera para los análisis se utilizaron, tamices, estufa de secado, muflas, horno eléctrico, bomba calorimétrica, segundo para la elaboración de briquetas se hizo con moldes cilíndricos y la compactación con una prensa hidráulica de 30 toneladas, donde se generaron material solido con forma cilíndrica, tercero se evaluó las propiedades físico – químicas de cada tipo de muestras, esto fue realizado con los mismo instrumentos y aparatos de la caracterización primaria, por otro lado el ensayo de la resistencia inconfiada se hizo con el equipo presan Marshall modelo PS-25 serial 256 – 2 a 50, estos resultados fueron analizados con la aplicación minitab, en el cual la mejor mezcla dio con mayor presión y concentración de finos de coque.

3.5 Presentación De Resultados

La presentación de resultados de este anteproyecto se hará de acuerdo con tablas hechas en Microsoft Excel, esto se hace con el fin de realizar comparación y análisis de los datos obtenidos en laboratorio.

4. Materiales Y Métodos

4.1 Recolección De Material

Los finos de coque son subproducto que deja el proceso de cribado en la fabricación del coque, estos son transportados por medio de volquetas y son acopiados en pilas, a diferencia de los finos de carbón que son producidos por el molino de molienda de carbón y estos residuos se acumulan debajo del equipo.

Para la fabricación de briquetas se inició con la recolección de materia prima en la planta Indumax ubicada en la vereda paso dos ríos, vía corregimiento San Faustino (figura 5), el muestreo se realizó bajo la norma estandarizada ASTM D2234 y D6883, se efectuó la toma de 35 incrementos en la pila de finos de coque y carbón, cumpliendo con el peso mínimo de cada muestra representativa. En la figura 6 se evidencia el muestreo en la pila de coque y en la figura 7 el muestreo de finos de carbón.



Figura 5. Ubicación de planta Indumax

Inicialmente se realizó el proceso de cuarteo manual como se evidencia en la figura 8, con el fin de reducir el material y escoger una muestra representativa de ella, posteriormente se remitió a preparación fina (ASTM, 2018) del laboratorio Indumax para pulverizar el material y analizar sus

propiedades fisicoquímicas en el laboratorio de la planta como se observa en la figura 9, tales como, contenido de humedad, materia volátil, cenizas, carbono fijo e índice de hinchamiento a diferencia del poder calorífico y azufre que fue enviado a SGS Colombia.



(a) Muestreo en la pila de finos de coque



(b) pilas de finos de coque

Figura 6. Muestreo de coque



(a) Muestreo de finos de carbón (b) almacenamiento de los finos de coque en bolsa plástica y costal (c) finos de carbón acopiados debajo del molino

Figura 7. Muestreo y almacenamiento de la muestra



(a) Cuarteo manual

(b) pesaje de la muestra representativa

Figura 8. Cuarteo y peso de muestras**Figura 9. Pulverizado de finos**

4.2 Distribución De Tamaños De Partículas

Para conocer los diferentes tamaños que poseía la materia prima después de recolectada, se utilizó el método tamices estandarizados, en donde separa la muestra de la materia prima mediante tamices según serie Tyler y posteriormente calcular que porcentaje fue pasante y que porcentaje fue retenido.

Durante el proceso de tamizado manual de los finos de coque y finos de carbón se utilizaron diferentes mallas, así mismo, una balanza digital como se evidencia en la figura 10.

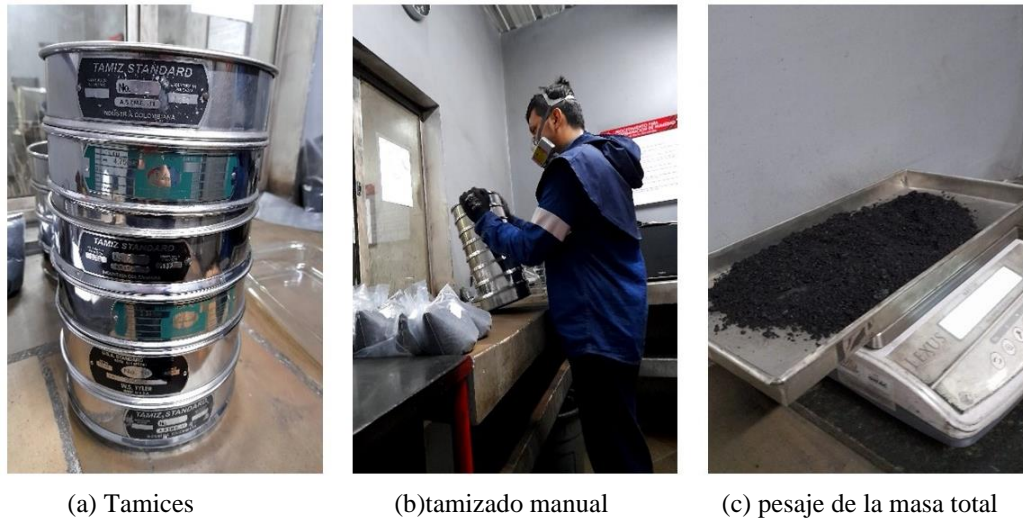


Figura 10. Tamizado

El ensayo se realizó para 1000g de cada material seco (finos de coque y finos de carbón) bajo la norma estandarizada ASTM D 4749-87, se utilizaron tamices de ½, 3/8, ¼, 4, 6,8, 18, 60 pulgadas todos acoplados, uno encima de otro, en orden de mayor a menor abertura y un fondo en donde recoge partículas más finas. Se realizó por medio de tamizado manual, donde se agitó por aproximadamente 10 minutos. Realizada la agitación manual, se procedió a pesar la masa retenida en cada uno de los tamices, para este procedimiento se utilizó una balanza digital marca Trumax modelo MIX A300. Finalmente se calculó el porcentaje retenido en masa a través de la siguiente ecuación.

$$\%Retenido = \frac{m_r}{m_t} * 100 \quad (12)$$

Donde:

m_r = masa retenida en cada tamiz (gr)

m_t = masa total de la muestra (gr)

4.3 Elaboración De Briquetas

De acuerdo con el diseño experimental propuesto, se elaboraron 45 briquetas de finos de coque y carbón; 18 se utilizaron para realizar la prueba de resistencia a la compresión y 27 para efectos de análisis. Se planteó el modelo de mezcla dos factores tres niveles como se reporta en la Tabla 6 y donde se manejan tres mezclas en distintas concentraciones de finos de carbón con una humectación constante como se evidencia en la tabla 3.

Tabla 6. Mezclas

Mezclas	Finos de coque	Finos de carbón	Humectación
Mezcla 1	90	10	7%
Mezcla 2	80	20	7%
Mezcla 3	70	30	7%

Inicialmente se procedió a mezclar los finos de coque y carbón conformando este material en una pila, posteriormente se utilizó una pala de mano para homogenizar la mezcla mediante la secuencia de los ciclos repetitivos desplazándola de un lado a otro hasta alcanzar un material homogéneo, en la figura 11, se observa las diferentes mezclas entre finos de coque (90%, 80% y 70%) y finos de carbón (10%, 20% y 30%) que se prepararon para elaborar los prototipos de briqueta, luego se compactó la mezcla por medio de prensado uniaxial manual como se observa en la figura 13(E), se utilizó una prensa hidráulica de 30 toneladas marca IHIDA, en el que se produjeron briquetas en formas cilíndricas con medidas promedio de 5.08 cm de diámetro y su altura promedio de 10.2 cm.

Las cuales fueron conformadas mediante moldes cilíndricos con las dimensiones anteriores como se aprecia en la figura 12, estos moldes se usan de la siguiente forma: el molde #6 se coloca en las placas de la prensa hidráulica, introducimos el molde #2 y seguidamente insertamos un dado de soporte de muestra en este caso el #4 (Ver figura 13(A)) e introducimos la mezcla (Ver figura

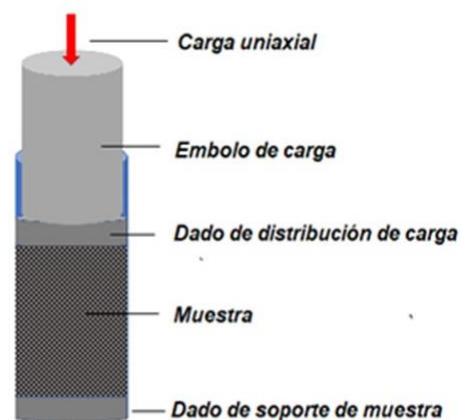
13(B)) y posteriormente ajustamos el dado de distribución de carga #3 en la parte superior (Ver figura 13(C)) con el fin de que con el embolo de carga (molde #1) realice una fuerza transversal comprimiendo el material y esto ayuda a la aglomeración de las partículas conformando la briqueta (Ver figura 13(D)). La fuerza ejercida se realizó por medio del gato hidráulico (Ver figura 13(E)), se debe tener en cuenta que para efectos del prensado se trabajará entre 20, 30 y 50 MPa teniendo una duración de prensado por briqueta aproximadamente 20 minutos (Ver figura 13(F)).



Figura 11. Mezclas



(a) Moldes cilíndricos



(b) esquema de prensado uniaxial

Figura 12. Moldes cilíndricos



Figura 13. Proceso de compactación

Posteriormente, las muestras se secaron a una temperatura ambiente por 48 horas aproximadamente como se ilustra en la figura 14 y así poder realizar los análisis que se han mencionado en esta investigación. Así mismo, se aprovecha la luz solar de la ciudad de San José de Cúcuta ya que se caracteriza principalmente por sus climas cálidos.



Figura 14. Briquetas secadas a temperatura ambiente

Una vez seca las briquetas, se procede a embalarlas con plástico y se rotulan con la nomenclatura de cada briqueta como se observa en la figura 15, esto se hace con el fin de que no altere la humedad del material.



Figura 15. Embalaje de las briquetas

4.4 Análisis Físicos – Químicos De La Briqueta

4.4.1 Análisis Próximos + FSI. Las muestras fueron estudiadas por los análisis próximos e índice de hinchamiento, estos se ejecutaron según la norma ASTM, por el cual cada uno se rige por una diferente dependiendo de lo que se vaya a determinar. Inicialmente se determinó la humedad utilizando la estufa a una temperatura $\pm 105^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ durante una hora según la norma ASTM D3173 y posteriormente las propiedades se calcularon en base seca.

Para efectos de cálculo de la materia volátil se utilizó la mufla, donde se sometió un gramo de muestra a este equipo durante 4 horas siguiendo la norma D3175, así mismo se tomó un gramo de muestra en un crisol en la mufla a una temperatura de $500^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ a $750^{\circ}\text{C} \pm 15^{\circ}\text{C}$ a lo largo de una hora para determinar las cenizas siguiendo la norma D3174.

Por otro lado, se determinó el carbono fijo, restándole los porcentajes de los anteriores análisis a un 100% como se indica en la norma D3172, así se obtuvo los análisis próximos en este estudio. Finalmente, se tomó un gramo de muestra que fue aplicada en un crisol, donde se introduce en el horno eléctrico, donde la muestra se aglomeró (aumento de volumen), este análisis fue ejecutado

siguiendo la norma D 720.

4.4.2 Análisis Elementales. Se calculó los contenidos de carbono, hidrógeno, nitrógeno y azufre mediante la diferencia de 100 y el oxígeno se basó por la norma ASTM D3176.

Poder calorífico. El poder calorífico se determinó mediante la técnica de la bomba calorimétrica a un volumen constante. Todas estas muestras fueron clasificadas a una granulometría de 60 pulgadas y quemadas en oxígeno puro a una presión de 3000 KPa. Para efectos de cálculo se tomó 1 gramos de la muestra después fue introducida dentro un recipiente de metal con atmosfera de oxígeno a presión. La bomba se sumergió en un recipiente con pared doble que tenía agua en su interior y en la camisa aislante. El calorímetro realizó la ignición de la muestra mediante la conexión eléctrica externa y calculó la energía liberada en el proceso de combustión después de que transcurrió quince minutos, el anterior análisis se realizó bajo la norma ASTM D5865.

Resistencia a la compresión inconfiada. Obtenidos los cilindros sólidos compuestos por los materiales, se realizó el ensayo a la compresión inconfiada de acuerdo con la norma ASTM D 2166-00, para evaluar su resistencia y así saber que tanto soporta cada briqueta, se realizó este procedimiento con un equipo marca Marshall modelo PS-25 serial 256 – 2 a 50 kN como se evidencia en la figura 16.



Figura 16. Ensayo a la compresión inconfiada

Para la realización de este ensayo se seleccionaron 18 briquetas que cumplieran con la longitud mínima (2 pulgadas) definida según la norma estandarizada ASTM 2166-00 como se evidencia en la figura 17, por otro lado, se ubicó la muestra en el aparato de carga en la mitad, seguidamente se aplicó una fuerza con una velocidad constante mediante el pedal del equipo y se ejercía hasta que la probeta fallara.



Figura 17. Ensayo a la compresión inconfiada

4.4.3 Propiedades Térmicas De Las Briquetas. El comportamiento térmico de los finos de carbón se estudió mediante calorimetría diferencial de barrido y termogravimetría, mientras que las propiedades térmicas de las briquetas conductividad térmica (λ), difusividad térmica (α) y la capacidad calorífica volumétrica (ρc) fueron medidas usando el sensor dual SH-1 del sistema KD2 Pro®, el cual funciona con el principio físico de flujo lineal transitorio de calor, según la norma ASTM D5334-14.

En la figura 18, se presenta una imagen del sensor SH-1, así como un diagrama explicativo que permite explicar el principio físico del flujo lineal transitorio de calor, el cual según (Xiaoli Ma, 2008), cuando un flujo transitorio de calor $Q(J/m)$ se aplica durante un tiempo determinado t_h , y se mide la temperatura a una distancia r durante el calentamiento y posteriormente en el periodo de enfriamiento, la variación de la temperatura en el tiempo se describe por la ecuación:

$$\Delta T = -\frac{Q}{4\pi k} E_i\left(\frac{-r^2}{4\alpha t}\right) \quad 0 < t \leq t_h \quad (13)$$

Donde k (W/mK) es la conductividad térmica efectiva, α (m²/s) es la difusividad térmica del medio, y E_i es la integral exponencial en el tiempo (Abramovitz & Stegun, 1972).

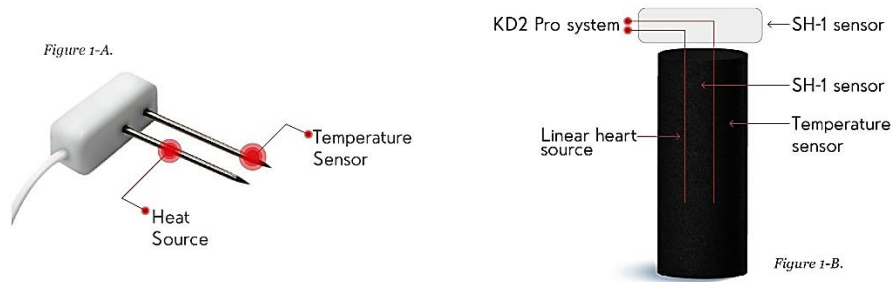


Figura 18. Sensor dual SH-1 del sistema KD2 Pro y diagrama teoría flujo lineal transitorio de calor

Fuente: Gifimac.

Se debe tener en cuenta que para el sensor SH-1, $r = 6$ mm, que es la separación entre las dos agujas (figura 18). Posteriormente las temperaturas se procesan, restando la temperatura ambiente, multiplicando por 4π y dividiendo por Q (ver ecuación (13)). Los datos resultantes se ajustan usando un procedimiento de mínimos cuadrados no lineal mediante la siguiente expresión (Decagon Devices, 2006):

$$T^* = b_0 t + b_1 \left\{ E_i\left(\frac{b_1}{t}\right) - E_i\left(\frac{b_2}{t - t_h}\right) \right\} \approx b_0 t + b_1 E_i\left(\frac{b_2}{t}\right) \quad (14)$$

$$T^* = \frac{4\pi(T - T_o)}{Q} \quad (15)$$

Donde b_0 , b_1 y b_2 son parámetros de ajuste, T_o es la temperatura al inicio de la medición y Q es la entrada de calor. La ecuación (14) se aplica durante los primeros segundos, mientras el calor

es aplicado, y la expresión (15) se aplica cuando se apaga la fuente de calor o durante el enfriamiento. La conductividad térmica efectiva k (W/mK) del medio (muestra) se calcula usando la siguiente ecuación:

$$k = \frac{1}{b_1} \quad (16)$$

Mientras que la difusividad térmica α ($\frac{m^2}{s}$), se determina por la ecuación:

$$\alpha = \frac{r^2}{4b_2} \quad (17)$$

Por otra parte, una vez conocida k y α , se calcula el calor específico por unidad de volumen (ρc) y la efusividad térmica (ϵ) mediante las siguientes ecuaciones (Abramovitz & Stegun, 1972):

$$\rho c = \frac{k}{\alpha} \quad \text{y} \quad \epsilon = k\alpha^{\frac{1}{2}} \quad (18)$$

5. Discusiones Y Análisis De Los Resultados

5.1 Caracterización De La Materia Prima

Tabla 7. Caracterización de los finos

Característica	Finos de Coque	Finos de Carbón
Humedad total	12,24	8,54
Cenizas dry	22,98	8,04
Materia volátil	4,78	35,58
Carbono fijo	72,24	56,38
Fsi	-	8
Azufre	0,634	0,86
Poder calorífico dry (Btu/lb)	11101	14330

Los resultados obtenidos de la caracterización de los finos de coque y carbón se resumen en la tabla 7, en donde se evidencia que en el fino de coque hay un incremento de humedad del 30,22% en relación con los de finos de carbón, lo anterior es debido a que el coque presenta una porosidad mayor que la del carbón por lo cual puede retener mayor humedad, así mismo es claro que entre más baja sea la humedad del carbón durante el proceso de coquización optimizará el rendimiento y la calidad del coque producido.

Por otra parte, un incremento en la humedad del carbón aumenta la velocidad de calentamiento en la muestra lo cual es consecuencia del incremento de la conductividad térmica con la humedad, sin embargo, una rapidez de calentamiento alta trae como consecuencia una disminución en el rendimiento del coque, pues los vapores de la humedad en el interior del carbón tendrían que viajar a través de la capa de semicoque afectando la densidad del coque (Fang, 2019).

Para la elaboración de las briquetas el contenido de humedad es un parámetro importante durante el proceso de compactación por prensado sirviendo como aglutinante durante el conformado (Elias Ricardo Durango Padilla, 2016) por lo que la humedad recomendada para la elaboración de briquetas debe estar en un intervalo de 10% a 15% según (Tripathi, 1998)

(Rodríguez I. B., 2004). Respecto a cenizas, se evidencia para el fino de coque un valor alto, toda vez que el valor recomendado es del 10%, y se encontró que tiene un 65% de aumento en comparación al fino de carbón que se encuentra en un valor dentro de los rangos permitidos (A. Babich, 2009), un alto contenido de cenizas influye directamente en el poder calorífico del coque y modifica el índice de basicidad como también la densidad (A. Babich, 2009).

Así mismo, se aprecia que el fino de carbón presenta un porcentaje de cenizas que lo caracteriza en el intervalo de carbones altos volátiles según la norma ASTM D388. Ahora bien, al comparar este parámetro con la materia volátil, se aprecia que los finos de carbón tienen un 86,5 % más que los finos de coque, lo cual era de esperarse, debido a que el coque durante su proceso elimina esta materia, cabe destacar que el fino de coque tiene mayor porcentaje de materia volátil que el coque comercial, lo cual se debe a que durante el proceso de cribado éstos finos corresponden en su mayoría al coque superficial que rodea al coque de mayor densidad.

Con relación al carbono fijo, el fino de coque tiene un 72,24%, lo que representa la mayor fuente de calor durante la combustión al contrario del fino de carbón que posee un contenido de carbono fijo de 56,38%, este parámetro es una medida de la cantidad de carbón que queda en la muestra, y tiene la tendencia opuesta de la materia volátil razón por la cual los finos de coque a diferencia de los de carbón presentan un bajo porcentaje de materia volátil pero un alto valor de carbono fijo.

El contenido de carbono fijo también es un criterio importante para estimar la cantidad de coque que se puede obtener de un carbón (Aich, 2019). Respecto del índice de hinchamiento, se observa que el FSI de los finos de carbón se encuentra dentro del rango de alto coquizables, clasificándolo como carbón bituminoso (S.G. Sahu, 2010), dicho parámetro aportará a la briqueta alto grado de compactación o unión de las partículas durante el aglutinamiento (. Tayebi Khorami,

2011).

El contenido de azufre de finos de coque fue de 0,634%, sin embargo, el fino de carbón fue de 0,860%, estos valores se encuentran dentro del rango permitido para el Ministerio del Medio Ambiente de Colombia, el cual no debe exceder el 1% (Elias Ricardo Durango Padilla, 2016), es decir, no hay afectación a los equipos porque hay un menor porcentaje de corrosión y esto beneficia a los procesos industriales de alto horno y ferroaleación (Castillo, 2018).

Finalmente, el poder calorífico más alto se encuentra en los finos de carbón con 14330Btu/lb y en los finos de coque es de 11101 Btu/lb, esto se debe a que un alto contenido de cenizas afecta al poder calorífico y a su vez el índice de basicidad (A. Babich, 2009), por otra parte, los volátiles ayudan a una ignición más rápida a los combustibles (Elias Ricardo Durango Padilla, 2016).

5.2 Distribución De Tamaños

En la Tabla 8, se presenta los resultados del análisis granulométrico para la muestra representativa de los finos de coque y carbón usados durante la investigación. Se observó una amplia distribución del tamaño de partícula de dichas muestras, en el cual la fracción retenida en la malla 60 es del 26,92% de finos de coque y un 30,218% de finos de carbón, seguida por la fracción retenida en la malla 18 que es del 19,24% en finos de coque y 29,907% de finos de carbón. Estos dos retenidos producen el 46,16% de los finos de coque y el 60,125% de los finos de carbón. Cabe señalar que, con respecto a lo evidenciado en relación con la distribución del tamaño de partícula, la muestra representativa de cada uno de los materiales corresponde efectivamente a finos que se encuentra a tamaños inferiores de 10mm.

Tabla 8. Clasificación granulométrica de los finos de coque y carbón

Abertura del tamiz		Producto	
Pulgadas	Milímetros	Finos de carbón	Finos de coque
1/2	12,5	0,000	0,000
3/8	9,5	2,166	1,253

Continuación tabla 8. Clasificación granulométrica de los finos de coque y carbón

Abertura del tamiz		Producto	
Pulgadas	Milímetros	Finos de carbón	Finos de coque
1/4	6,3	3,861	10,066
4	4,75	4,674	10,347
6	3,35	8,053	9,926
8	2,36	12,005	11,069
18	1,00	29,907	19,240
60	0,25	30,218	26,920
Fondo		9,116	11,179
Total		100,000	100,000

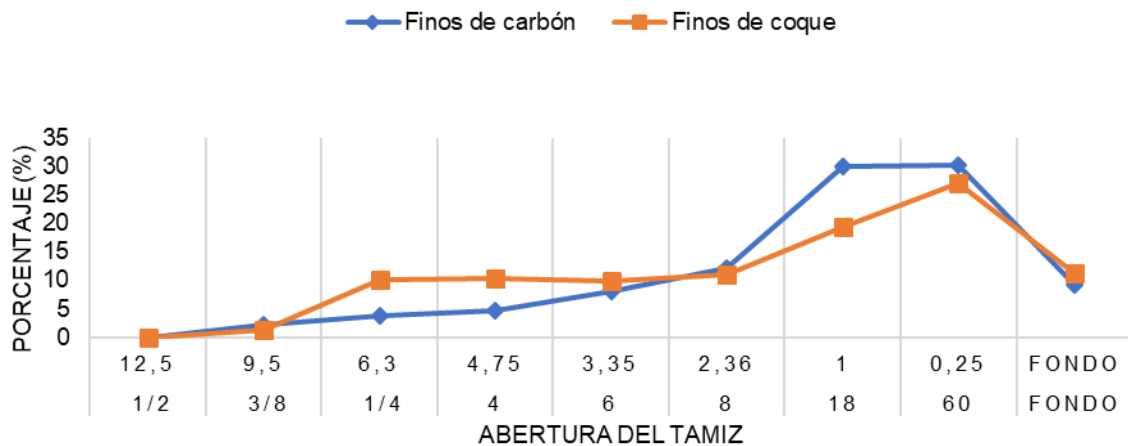


Figura 19. Curva granulométrica del coque y carbón

En la figura 19, se presenta la curva granulométrica de los finos de coque y carbón donde su mayor porcentaje de retenido se evidenció entre las mallas 60 y 18, se pudo evidenciar que las partículas más pequeñas se presentaron en los finos de carbón a comparación con los finos de coque, por lo contrario, los tamaños más grandes tuvieron el mayor porcentaje se ha comparación con los finos de carbón. En la figura 20 se reporta la clasificación de tamaños de finos de coque y carbón, según Masgutova, Strakhon et al, tamaños menores de 3mm hará que la resistencia a la compresión sea mayor, por el cual, estos granos se ubicaran en los espacios vacíos para alcanzar un material con mayor cohesión (I. I. Masgutova, 2013).

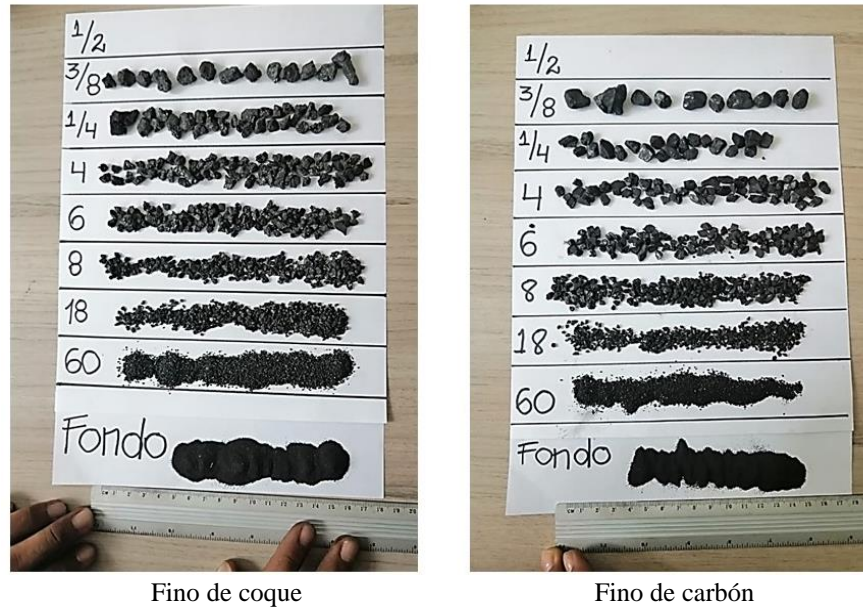


Figura 20. Tamaño de partícula por malla de los finos

Es importante resaltar que una buena distribución de tamaños de partículas entre los finos de coque y carbón durante el conformado de la briqueta permitirá la integración entre los materiales debido a las fuerzas adhesivas resultantes entre el aglutinante húmedo y las fuerzas capilares entre las partículas, proceso en el cual se pueden presentar estados como:

- Estado pendular: las partículas se mantienen unidas mediante puentes líquidos en sus puntos de contacto; Estado funicular: algunos poros están completamente saturados de líquido, pero aún quedan vacíos llenos de aire;
- Estado capilar: todos los espacios entre las partículas se llenan de líquido, pero el líquido de la superficie se vuelve a introducir en los poros por acción capilar;
- Estado de lechada: las partículas están completamente sumergidas en líquido y la superficie del líquido es convexa, es decir, sin acción capilar en la superficie (Firat Burat, 2015).

5.3 Elaboración De Briquetas

En la tabla 9 se reportan los análisis de tres tipos de mezclas en concentraciones 10,20 y 30% en porcentaje de finos de carbón y la diferencia en finos de coque a una humectación constante del

7%. Así mismo, al comparar los valores de la Tabla 4, con los de la Tabla 6, los cuales corresponden a los análisis de las briquetas para las tres mezclas, se aprecia que a medida que la concentración de finos de coque se incrementa, aumenta levemente la humedad, mientras que la materia volátil disminuye, también se aprecia que el poder calorífico de las briquetas se incrementa, al aumentar la concentración de finos de carbón.

Los análisis próximos evidencian que a medida que le aplicamos más porcentaje de carbón va a tener mejores propiedades energéticas, el contenido de cenizas de la mezcla 3 fue aproximadamente de 17,72% siendo más baja en comparación de las otras mezclas.

La materia volátil con mayor contenido de carbón eleva los gases de las mezclas siendo M3 quien presentó un alto contenido de 16,53%, los volátiles están compuestos por vapores, gases y solo una pequeña porción de estos posee alto poder calorífico, por lo tanto puede considerarse que el contenido de volátiles no es determinante en las características de los combustibles, sin embargo, alto contenido de volátiles indica que el combustible se quema rápidamente en la etapa de ignición (Elias Ricardo Durango Padilla, 2016), es por eso que las biomásas poseen un contenido más alto que el carbón (Sánchez, 2010).

Los análisis elementales son carbono, hidrógeno, nitrógeno, oxígeno y azufre, los resultados mostraron que la mezcla 1, 2 y 3, posee un carbono de 72,6%, 72,2% y 73,6% en donde se encuentra bajos en comparación al coque de fundición que oscilan entre 86,2% y 96,% respectivamente (S. A. Adygezalova, 2010), y un porcentaje de azufre de 0,687%, 0,671% y 0,714% donde evidenciamos que estos valores se encuentran dentro de los rangos permitidos de acuerdo a la Resolución 623 de 1998, capítulo II, artículo 1 del Ministerio del Medio Ambiente, expresa que el contenido de azufre no podrá exceder el 1%, y para la calidad del coque requerido para el alto horno está entre 0,5% a 0,9%, (M.A. Díez, 2001), el azufre afecta las propiedades del acero, en

las mezclas tiene contenido en los rangos para los procesos industriales.

El mayor contenido de oxígeno e hidrógeno fue de la mezcla 3, se puede evidenciar que los parámetros de los análisis elementales anteriores aumentan directamente proporcional al contenido de fino de carbón.

Tabla 9. Resultados de mezclas

Característica	Mezcla 1 90, 10%	Mezcla 2 80, 20%	Mezcla 3 70, 30%
Humedad total	9,07	8,35	7,81
Cenizas	18,6	18,8	17,72
Materia volátil	12,05	13	16,53
Carbono fijo	69,35	68,19	65,74
Fsi	1,5	1	1
Poder calorífico	11496	11489	11779
Azufre	0,687	0,671	0,714
C	72,6	72,2	73,6
H	1,39	1,9	2,3
N	1,16	1,23	1,3
O	3,03	3,56	4,05

En la figura 21 se reporta el poder calorífico de las briquetas, así mismo a partir de los datos de la Tabla 6 se evidencia que a medida que se incrementa la concentración de finos de carbón, la briqueta se ve favorecida por el aumento en el poder calorífico, este comportamiento se asocia con la característica combustible del carbón, quien además de cumplir su función principal de unir las partículas y así provee al aglomerado un aumento del poder calorífico, que permitirá un mejor comportamiento energético de la briqueta al momento de quemarse, la mezcla 3 fue de 11.779 BTU/LB la que más se aumentó comparada con el fino de coque inicialmente, esta elevación de valor calórico fue de 5,756%, la mezcla 2 fue de 11.489 BTU/LB aumento 3,377%, y la mezcla 1 fue de 11.496 que aumento 3,435%, se observó que a medida que se incrementa el contenido de carbón es mayor la cantidad de calor por gramo (Castillo, 2018), el poder calorífico de un coque metalúrgico típico colombiano es de 12.180 BTU/LB, las muestras desarrolladas en el trabajo están

por debajo al coque metalúrgico.

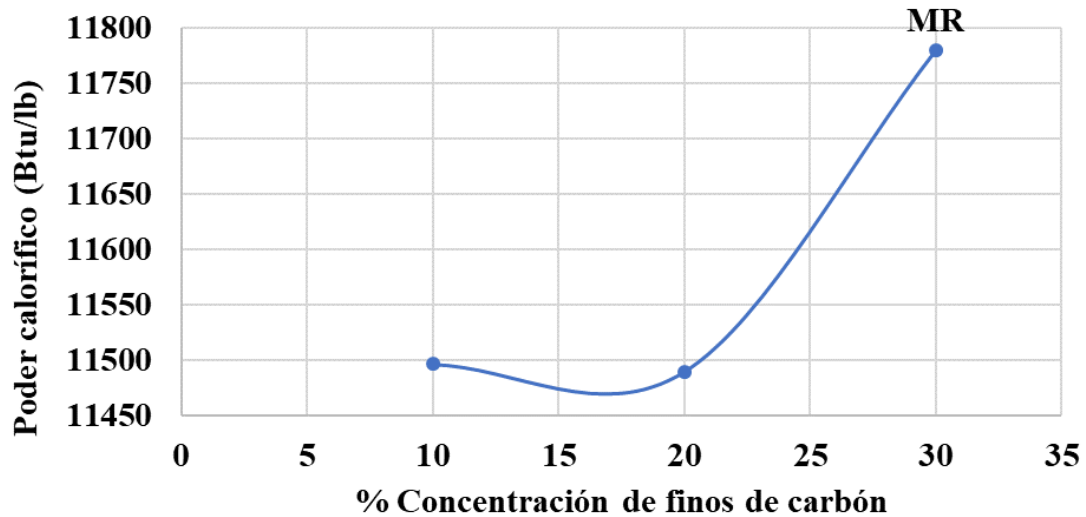


Figura 21. Efecto del fino de coque sobre poder calorífico superior

En la figura anterior se representa como MR, una muestra representativa que evidencia la tendencia del aumento del poder calorífico de la briqueta, gracias al incremento de la concentración del fino de carbón, que es de 11779 BTU/Lb.

5.4 Evaluación De Briquetas Obtenidas

5.4.1 Modelo De Briquetas Basados En Diseño Experimental 32. Se reporta en la Tabla 10 los resultados de la resistencia a la compresión inconfiada de las 18 briquetas elaboradas, donde las de mayor presión y concentración de finos de coque presenta una resistencia más alta en comparación de las demás.

Tabla 10. Resultado del diseño experimental 32

Presión (Mpa)	Finos de carbón (%)	Resistencia (Kn)
20	10	0,49
20	10	0,52
20	20	0,66
20	20	0,7
20	30	0,72
20	30	0,76
30	10	0,57

Continuación tabla 10. Resultado del diseño experimental 32

Presión (Mpa)	Finos de carbón (%)	Resistencia (Kn)
30	10	0,6
30	20	0,83
30	20	0,87
30	30	0,9
30	30	0,78
50	10	0,66
50	10	0,66
50	20	0,86
50	20	0,84
50	30	0,82
50	30	0,95

En la tabla 11, se presentó el resumen del modelo, en el cual tuvo un r2 de 93,77%, en el cual, indicó un mayor porcentaje de precisión y confiabilidad ya que está cerca del 100%, así mismo, el modelo (S) tiene un error estándar bajo (Tamayo, 2012).

Tabla 11. Resumen del modelo

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)
0,0461278	93,77%	88,22%

En la figura 22, se presenta el diagrama de Pareto en donde se aprecia que el índice de Durbin Watson detecta una autocorrelación en el modelo analizado que los dos factores son representativo para este tipo de diseño, así mismo, el facto B (concentración de finos de carbón) mostró mayor representación al facto A (presión de compactación), corroborando con la tabla 8, se concluye que este modelo es ideal para emplearlo a la elaboración de briquetas. La respuesta es Resistencia (KN); $\alpha = 0,05$)

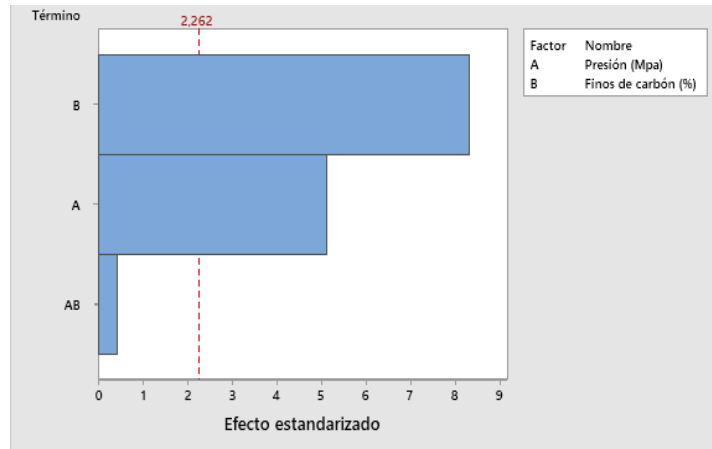


Figura 22. Diagrama de Pareto para factor A y factor B

En la figura 23, se reporta la gráfica de interacción para la resistencia (kN) con los ajustes que le hace el programa, esto demostró la influencia de la presión y concentración de finos de carbón para la resistencia en donde a mayor presión y concentración aumenta la resistencia de la briqueta, así se pudo determinar que la muestra más representativa fue la de 50Mpa (presión) y 30% (finos de carbón).

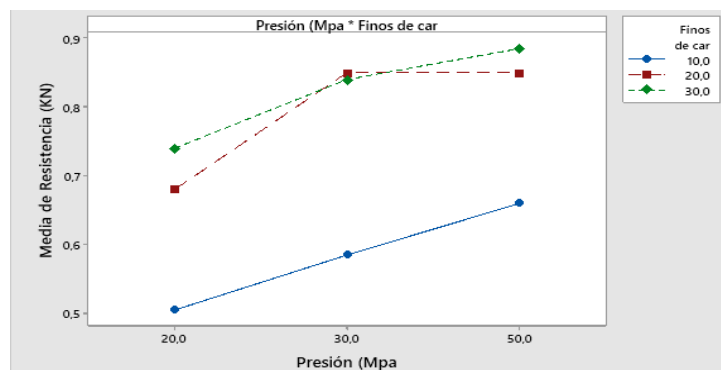


Figura 23. Gráfica de interacción para resistencia (KN)

En la figura 24, se presenta la gráfica de optimización con maximización de la respuesta de resistencia de la briqueta, indico que tuvo mayor relevancia fue la de presión 50Mpa y 30% de finos de carbón, esto se puede corrobora con la figura 25 y figura 26.

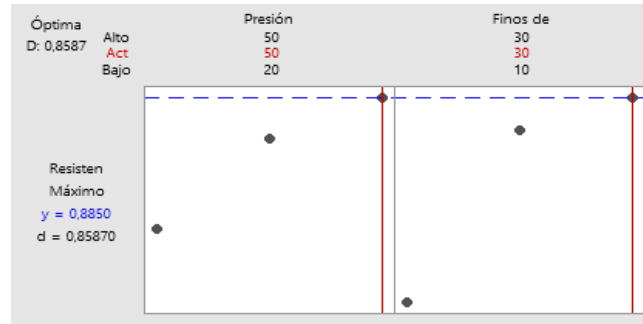


Figura 24. Grado de optimización

5.4.2 Ensayo De Resistencia A La Compresión Inconfinada. En la tabla 12 se reporta el promedio de la resistencia a la compresión inconfinada de las muestras según la norma ASTM D 2166-00, se puede evidenciar que a mayor presión y contenido de carbón se van a aglomerar más las partículas de los materiales trabajados, proporcionándole mayor resistencia (I. I. Masgutova, 2013) (Yu. N. Loginov, 2017), se puede observar que a 50MPa y 30% de finos de carbón es donde mayor la resistencia, las briquetas elaboradas con esas características soportan más carga que las demás, este resultado fue de 0.885 Mpa con una incertidumbre de ± 0.065 .

Tabla 12. Resistencia a la compresión

Factor A (Presión, MPa)	Factor B (concentración finos de carbón, % peso)	Resistencia a la compresión inconfinada (KN)
(1)=20	(1)=10	0,505 \pm 0,015
(1)=20	(2)=20	0,68 \pm 0,020
(1)=20	(3)=30	0,74 \pm 0,020
(2)=30	(1)=10	0,585 \pm 0,015
(2)=30	(2)=20	0,85 \pm 0,020
(2)=30	(3)=30	0,84 \pm 0,060
(3)=50	(1)=10	0,66 \pm 0,000
(3)=50	(2)=20	0,85 \pm 0,010
(3)=50	(3)=30	0,885 \pm 0,065

La presión es un factor muy importante en ligar los aglomerados ya que puede producir briquetas con alta densidad, alta resistencia y baja porosidad, influyendo notoriamente en las propiedades de la briketa final. (Lina Marcela Sánchez Valencia, 2016). La resistencia a la

compresión de las briquetas depende de la magnitud de la fuerza aplicada, es por eso, que se reporta en la figura 25 que a medida que aumenta la presión de compactación paralelamente con la concentración de finos de carbón obtendremos una briketa más resistente. Este comportamiento se podría deber a que la presión ejercida disminuye la distancia entre las partículas creando y desarrollando nuevos enlaces entre los finos de carbón (Ozbayoglu, 2010).

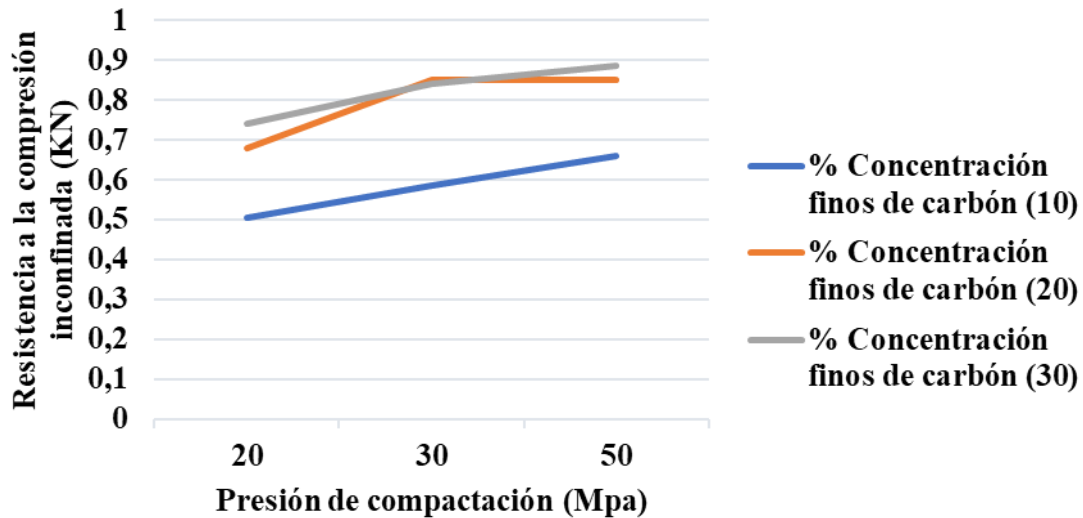


Figura 25. Resistencia a la compresión inconfiada vs presión de compactación

5.4.3 Poder Calorífico. La determinación del poder calorífico puede realizarse experimentalmente según lo establecido en la norma ASTM D5865-03, en la tabla 13 se reporta los resultados del diseño experimental 32, se observa que la mezcla 70%-30% posee alto poder calorífico en comparación de las demás mezclas toda vez que es la compuesta con más alto concentrado de finos de carbón.

Es de agregar que, según la NTC 2060 es importante que la briketa supere el valor de 12,5MJ/Kg como valor mínimo para una briketa combustible, así mismo consideran otros autores que los rangos viables son 13,8 y 17,5 MJ/Kg según (Lina Marcela Sanchez Valencia, 2016).

Tabla 13. Poder calorífico

Factor A (Presión, MPa)	Factor B (concentración finos de carbón, % peso)	Poder calorífico (BTU/lb)
(1)=20	(1)=10	11496
(1)=20	(2)=20	11489
(1)=20	(3)=30	11779
(2)=30	(1)=10	11496
(2)=30	(2)=20	11489
(2)=30	(3)=30	11779
(3)=50	(1)=10	11496
(3)=50	(2)=20	11489
(3)=50	(3)=30	11779

En la figura 26, se reporta la gráfica de interacción para poder calorífico, esta tiene ajustes por el programa minitab, por eso se puede concluir que el factor de presión no tuvo influencia en el poder calorífico, que se presentó constantes en los tres puntos de prueba, por el contrario, la concentración de finos de carbón tiene correlación con el poder calorífico, por el cual, a medida que se aumente el porcentaje de finos de carbón, así va aumenta el poder calorífico.

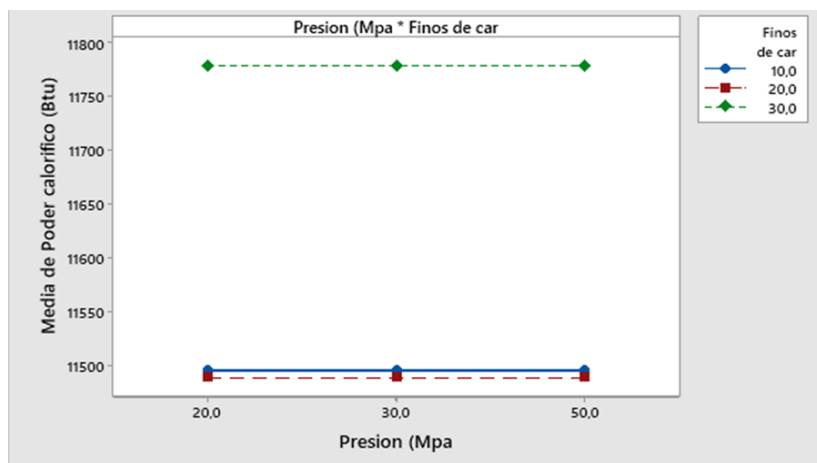


Figura 26. Gráfica de interacción para poder calorífico (BTU)

5.4.4 Propiedades Térmicas De Las Briquetas. En la figura 27, se presenta la gráfica de los datos de DSC-TGA de la muestra de finos de carbón, para el TGA se observa que entre 40 °C y 293,94 °C hay una pérdida de peso aproximada del 3,2% debida a la degradación de los

compuestos volátiles de bajo peso molecular, así mismo hay otra degradación del orden del 90,07% entre 336,21°C y 634,47°C, por otra parte se encontró una temperatura máxima de devolatilización alrededor de los 579°C, y que a partir de los 700°C se presenta el proceso de fusión, el cual está asociado a la formación del semi-coque (S.G. Sahu, 2010).

Para el DSC, no se aprecia ningún pico endotérmico entre 40 y 636°C, luego en esta región no se presenta fusión; mientras que entre 200 y 600°C se observan dos picos exotérmicos, que están asociados a procesos de degradación oxidativa de la materia volátil (~35%, ver Tabla 4) los cuales de describieron en el TGA; por otra parte, entre 700 y 1110°C se presenta un pico endotérmico, corroborando lo expuesto en el TGA el cual está asociado a un proceso de fusión.

También se observa que el pico es bastante ancho, indicando posiblemente muy poca homogeneidad estructural de la muestra (S.G. Sahu, 2010).

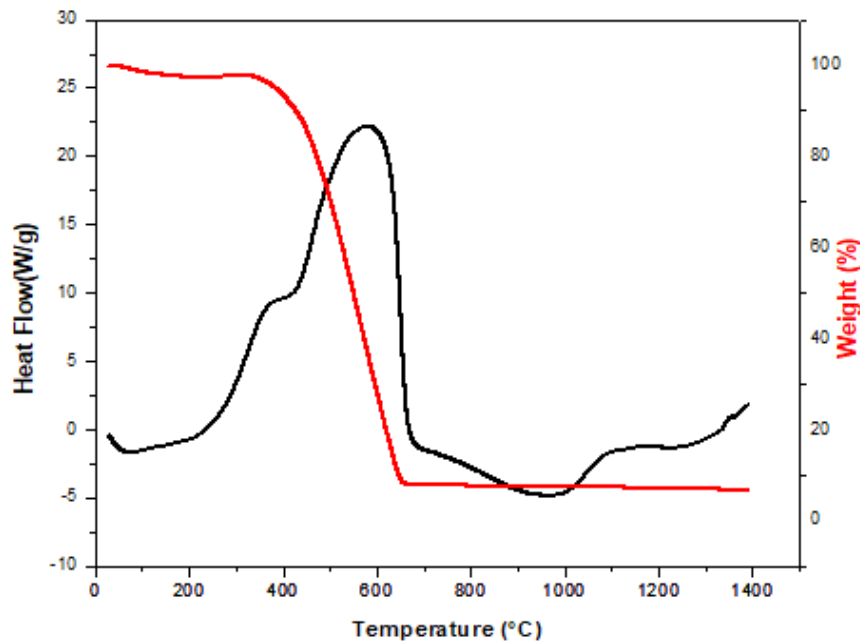


Figura 27. Datos del DSC - TGA del fino de carbón

Los valores de las propiedades térmicas a temperatura ambiente de las briquetas se presentan en la tabla 14. De estos se aprecia que k se incrementa hasta un 15% al disminuir la concentración

de finos de carbón, reportando el mayor valor para M1, que corresponde a la muestra con menor poder calorífico (ver Tabla 6), lo cual era de esperarse pues al poseer la mayor concentración de finos de coque, tiene estructuralmente la mayor concentración de cristales de grafito (Akito KASA, 1993).

Por otra parte, se aprecia que la muestra que reportó la mayor capacidad de almacenar o ceder energía fue M1, la cual es la que posee la mayor concentración de finos de coque, humedad y capacidad de intercambio de calor (ϵ). Es de resaltar que el fenómeno de transporte de calor en las muestras es vía fonónica, lo cual para las muestras corresponden a las vibraciones de los anillos aromáticos policondensados y a los puentes alifáticos entre éstos, que permiten la continuidad de los fonones contribuyendo al transporte de la energía (Charriau P, 2016).

Tabla 14. Propiedades térmicas a temperatura ambiente de las briquetas

Mezclas	$k \left(\frac{W}{m}\right)$	$\alpha \left(\frac{m^2}{s}\right) \times 10^{-6}$	$\rho c \left(\frac{J}{m^3 K}\right) \times 10^6$	$\epsilon \left(\frac{Ws^2}{m^2 K}\right)$
M3 (70-30%)	0,284 ± 0,002	0,231 ± 0,015	1,227 ± 0,008	590,259 ± 2,239
M2 (80-20%)	0,310 ± 0,001	0,324 ± 0,011	0,956 ± 0,003	545,199 ± 1,503
M1 (90-10%)	0,335 ± 0,011	0,202 ± 0,001	1,657 ± 0,030	746,103 ± 4,155

6. Conclusiones

En la caracterización de la materia prima presentó que los finos de coque tuvieron menos poder calorífico en comparación que los de carbón, así mismo, en los análisis próximos estos fueron más altos en cenizas y humedades, en cambio, la materia volátil menor, por otro lado, en la distribución granulométrica el fino de carbón tuvo un porcentaje de retenido mayor en los tamices de menor abertura, de igual manera, en el TGA y DSC se obtuvo un comportamiento del fino de carbón que se determinó con unas propiedades plásticas adecuadas para la aglomeración entre los materiales, esto dando un carbón bituminoso.

En la elaboración de las briquetas se compactaron las mezclas de las materias primas con una humectación del 7%, esto generó cilindros sólidos, así se analizaron en donde la muestra con mayor porcentaje de finos de carbón aumento un 2,3% en comparación de menor, sin embargo, con los finos de coque inicial tuvo un crecimiento del 5,7% en el poder calorífico, esto fue debido a que los finos de carbón presentaron mayor poder calorífico, por otro lado, la presión de compactación no tuvo ninguna influencia en este parámetro.

Las muestras se evaluaron la cual fue más representativa al 70%, 30% con presión de compactación de 50 Mpa, con mayor poder calorífico y resistencia a la compresión inconfina, de igual manera, en el comportamiento de las propiedades térmicas a temperatura ambiente de las briquetas elaboradas a partir de finos de coque y carbón compactadas a cierta presión, encontrándose que la mezcla con mayor concentración de coque presenta la mayor conductividad térmica y por ende la mayor capacidad calorífica volumétrica, siendo las que mayor humedad reportan. Estas briquetas se le pueden dar usos en los procesos industriales como generador de energía y solucionar la baja demanda de este subproducto, así consiguiendo una mayor rentabilidad en el mercado.

Con esta tesis se participó en el “5+1 INTERNATIONAL MEETING FOR RESEARCHERS IN MATERIALS & PLASMA TECHNOLOGY”, como ponentes con el artículo de investigación Effective thermal properties and proximate analysis of coke - coal fines mixtures, así mismo, aprobado para publicarlo Journal of Physics: Conference Series (JPCS).

7. Recomendaciones

Estudiar mezclas con finos de coque y antracita, ya que el subproducto presenta bajas propiedades químicas, en cambio, las antracitas es un material de mayor rango, en el cual, su poder calorífico y contenido de carbono fijo es mayor, pero su cenizas y materia volátil es menor al fino de carbón utilizado en el estudio “Elaboración de briquetas a base de finos de coque y carbón producidos en Planta Indumax – Norte de Santander”.

Por lo anterior, se recomienda elaborar briquetas a base de finos de coque y antracita, para mejorar su poder calorífico que es el parámetro de interés como combustible, así mismo, las otras propiedades químicas (humedad, cenizas, materia volátil azufre), de igual manera, introducir estas briquetas a proceso de cocción con escalas controladas para observar el comportamiento de aglomeración entre partículas, para finalmente, ser utilizadas en la comercialización de la empresa Carbomax.

Bibliografía

- Adygezalov, S. A., Dvortsov, S. P., Shemonaeva, T. N., Strakhov, V. M., & Surovtseva, I. V. (2011). Industrial production of coke briquets for cupola smelting of iron. *Coke and Chemistry*, 54(1), 19–22. <https://doi.org/10.3103/s1068364x11010029>
- Aich, S., Nandi, B. K., & Bhattacharya, S. (2018). Effect of weathering on physico-chemical properties and combustion behavior of an Indian thermal coal. *International Journal of Coal Science & Technology*, 6(1), 51–62. <https://doi.org/10.1007/s40789-018-0235-0>
- Ajiaco, F. (2011). Evaluación del comportamiento térmico de carbones del Cerrejón, carbones coquizantes y sus mezclas en la producción de coque metalúrgico (Pregrado). Universidad Nacional de Colombia.
- Alarcón, G. (2011). Efecto de los parámetros reológicos y petrográficos del carbón en la calidad del coque metalúrgico (Maestría). Universidad Nacional de Colombia.
- Ardila, M. A. (2016). Carbones y coque. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. https://www.academia.edu/4288405/CARTILLA_CARBONES_Y_COQUES
- ASTM D2013 / D2013M - 20 Standard Practice for Preparing Coal Samples for Analysis. (2020). ASTM international. <https://www.astm.org/Standards/D2013.htm>
- ASTM D3172 - 13(2021)e1 Standard Practice for Proximate Analysis of Coal and Coke. (2021). ASTM international. <https://www.astm.org/Standards/D3172.htm>
- ASTM D3173 / D3173M - 17a Standard Test Method for Moisture in the Analysis Sample of Coal and Coke. (2017). ASTM international. <https://www.astm.org/Standards/D3173.htm>
- ASTM D3173 / D3173M - 17a Standard Test Method for Moisture in the Analysis Sample of Coal and Coke. (2017b). ASTM international. <https://www.astm.org/Standards/D3173.htm>
- ASTM D3174 - 12(2018)e1 Standard Test Method for Ash in the Analysis Sample of Coal and

- Coke from Coal. (2018). ASTM international.
<https://www.astm.org/Standards/D3174.htm>
- ASTM D3175 - 20 Standard Test Method for Volatile Matter in the Analysis Sample of Coal and Coke. (2020). ASTM international. <https://www.astm.org/Standards/D3175.htm>
- ASTM D3176 - 15 Standard Practice for Ultimate Analysis of Coal and Coke. (2015). ASTM International. <https://www.astm.org/Standards/D3176.htm>
- ASTM D3302 / D3302M - 19 Standard Test Method for Total Moisture in Coal. (2019). ASTM international. <https://www.astm.org/Standards/D3302.htm>
- ASTM D4239 - 18e1 Standard Test Method for Sulfur in the Analysis Sample of Coal and Coke Using High-Temperature Tube Furnace Combustion. (2018). ASTM international.
<https://www.astm.org/Standards/D4239.htm>
- ASTM D5865 / D5865M - 19 Standard Test Method for Gross Calorific Value of Coal and Coke. (2019). ASTM international. <https://www.astm.org/Standards/D5865.htm>
- ASTM D720 / D720M - 15e1 Standard Test Method for Free-Swelling Index of Coal. (2015). ASTM international. <https://www.astm.org/Standards/D720.htm>
- Babich, A., Senk, D., & Gudenau, H. W. (2009). Effect of coke reactivity and nut coke on blast furnace operation. *Ironmaking & Steelmaking*, 36(3), 222–229.
<https://doi.org/10.1179/174328108x378242>
- Balaguera, S. M. (2014). Aspectos prácticos de la coquización en Cundinamarca y Boyacá. Grupo de investigación Cedemin UPTC.
https://revistas.uptc.edu.co/index.php/ingenieria_sogamoso/article/view/3449/3084
- Beatriz Cabal Álvarez. (2019). Estudio de nuevos ligantes para la fabricación de briquetas a partir de lodos de acería. Universidad de Oviedo.

https://digibuo.uniovi.es/dspace/bitstream/handle/10651/52772/TFM_BeatrizCabalAlvarez.pdf;jsessionid=5E6E6885D4CF599BB9C99EA740846344?sequence=6

- Beltran, M. R. (2020). En 2019 carbón aportó \$2,2 billones en regalías para las regiones - Noticias Principales de Colombia Radio. Noticias Principales de Colombia Radio Santa Fe 1070 am. <http://www.radiosantafe.com/2020/03/11/en-2019-carbon-aporto-22-billones-en-regalias-para-las-regiones/>
- boletinagrario.com. (2019). Agente aglutinante - ¿Qué es agente aglutinante? - significado, definición, traducción y sinónimos para agente aglutinante. <https://boletinagrario.com/ap-6,agente+aglutinante,1218.html>
- Burat, F., Kuyumcu, H. Z., & Sander, S. (2015). Effect of Particle-Size Distribution and Degree of Saturation on Coal-Compacting Processes within a Coke-Making Operation. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*, 35(4), 216–231. <https://doi.org/10.1080/19392699.2015.1024832>
- Cadena, A. (2016). Estudio de las transformaciones fisicoquímicas de carbones colombianos en el proceso de coquización (Doctor). Universidad Nacional de Colombia.
- Chen, L., Xing, L., & Han, L. (2009). Renewable energy from agro-residues in China: Solid biofuels and biomass briquetting technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(9), 2689–2695. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.06.025>
- Cruz, C. F. (2018). Diseño de mezclas de carbón y carbón-biomasa para producción de briquetas gasificables en lecho fijo. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. https://repositorio.uptc.edu.co/bitstream/001/3035/1/TGT_1618.pdf
- Díez, M., Alvarez, R., & Barriocanal, C. (2002). Coal for metallurgical coke production: predictions of coke quality and future requirements for cokemaking. *International Journal*

- of Coal Geology, 50(1–4), 389–412. [https://doi.org/10.1016/s0166-5162\(02\)00123-4](https://doi.org/10.1016/s0166-5162(02)00123-4)
- Durango, E., & Oquendo, J. (2018). Caracterización y evaluación energética de biocombustibles sólidos elaborados a partir de biomasa agroindustrial y carbón mineral del departamento de Córdoba (Pregrado). Universidad de Córdoba.
- Eatough, C. N. (1999). Clean production of coke from waste carbonaceous fines. Quarterly report for the period July-September 1999 (No. DOE/GO/10395-Q). Combustion Resources, LLC (US)(US).
- Eatough, C. N., Heaton, J. S., & Eatough, S. R. (2001). Clean production of coke (US7785447B2). Ekocoke LLC. <https://patents.google.com/patent/US7785447B2/en>
- Fang, H. M., Han, J., Zhang, H. J., Zhao, B., & Qin, L. B. (2019). Effect of coal moisture content on coke's quality and yields of products during coal carbonization. Journal of Central South University, 26(12), 3225–3237. <https://doi.org/10.1007/s11771-019-4248-7>
- Gavel, D. J. (2016). A review on nut coke utilisation in the ironmaking blast furnaces. Materials Science and Technology, 33(4), 381–387. <https://doi.org/10.1080/02670836.2016.1183073>
- Gavel, D. J. (2017). A review on nut coke utilisation in the ironmaking blast furnaces. Materials Science and Technology, 33(4), 381-387. Abramovitz, Milton; Irene Stegun (1972). Handbook of Mathematical Functions with Formulas, Graphs, and Mathematical Tables. Abramowitz and Stegun. New York: Dover. ISBN 0-486-61272-4
- Global Energy Trends - 2016 report | Enerdata. (2016). <https://www.enerdata.net/publications/reports-presentations/peak-energy-demand-co2-emissions-2016-world-energy.html>.
- Kasai, A., Murayama, T., & Ono, Y. (1993). Measurement of Effective Thermal Conductivity of

- Coke. *ISIJ International*, 33(6), 697–702. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.33.697>
- KD2 Pro Thermal Properties Analyzer, Operator's Manual, Version 4, (2006) Decagon Devices, Inc, 2365 NE Hopkins Ct. Pullman, WA 99163 USA.
- Khorami, M. T., Chelgani, S. C., Hower, J. C., & Jorjani, E. (2011). Studies of relationships between Free Swelling Index (FSI) and coal quality by regression and Adaptive Neuro Fuzzy Inference System. *International Journal of Coal Geology*, 85(1), 65–71. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2010.09.011>
- Loginov, Y. N., Babailov, N. A., & Polyansky, L. I. (2017). The properties of coke breeze briquettes produced by ram briquetting. *AIP Conference Proceedings*. Published. <https://doi.org/10.1063/1.5017382>
- Loginov, Y. N., Babailov, N. A., & Polyansky, L. I. (2017, December). The properties of coke breeze briquettes produced by ram briquetting. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 1915, No. 1, p. 040034). AIP Publishing LLC.
- Ma, X., Omer, S., Zhang, W., & Riffat, S. B. (2008). Thermal conductivity measurement of two microencapsulated phase change slurries. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 3(4), 245–253. <https://doi.org/10.1093/ijlct/3.4.245>
- Machado, A. D. S., Mexias, A. S., Vilela, A. C., & Osorio, E. (2013). Study of coal, char and coke fines structures and their proportions in the off-gas blast furnace samples by X-ray diffraction. *Fuel*, 114, 224-228.
- Machado, A. D. S., Mexias, A. S., Vilela, A. C., & Osorio, E. (2013). Study of coal, char and coke fines structures and their proportions in the off-gas blast furnace samples by X-ray diffraction. *Fuel*, 114, 224–228. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.07.064>
- Masgutov, I. I., Strakhov, V. M., Anikin, A. E., & Surovtseva, I. V. (2013). Increasing the strength

- of briquets produced from coke fines. *Coke and Chemistry*, 56(9), 343-348.
- Masgutov, I. I., Strakhov, V. M., Anikin, A. E., & Surovtseva, I. V. (2013). Increasing the strength of briquets produced from coke fines. *Coke and Chemistry*, 56(9), 343–348. <https://doi.org/10.3103/s1068364x13090056>
- Mora, F. (2015). Beneficios de los finos de coque (Pregrado). Universidad de la Sabana.
- Oliver, L. (2017). Que son las briquetas - Tienda Biomasa. Tienda Biomasa. <https://tiendabiomasa.com/briqueta>
- Quitian, A., & Grosso, J. L. (2010). Desarrollo de un proceso para la recuperación del material volátil por arrastre de vapor de carbones metalúrgicos de la región de Samacá (Boyacá). *Revista ION*, 23(1), 29–40. [tps://revistas.uis.edu.co/index.php/revistaion/article/view/953](https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistaion/article/view/953)
- Rodríguez, I. B. (2004). Manual de carbones y coquización. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. <https://es.scribd.com/doc/182315058/Manual-de-Carbones>
- Rodríguez, M. W. D. (2017). Production of briquettes with *Jatropha curcas* shell and sugar cane bagasse. Scielo. https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0717-92002017000300010&lng=en&nrm=iso&tlng=en
- S.G. Sahu, P. Sarkar, N. Chakraborty, A.K. Adak. (2010). Thermogravimetric assessment of combustion characteristics of blends of a coal with different biomass chars. *Fuel Processing Technology* 91 (2010) 369–378. doi:10.1016/j.fuproc.2009.12.001
- Sanchez, C. G. (2010). Tecnología da Gaseificação de Biomassas. Átomo Campinas,
- Sanchez, L., & Lopez, D. (2016). Obtención de briquetas a partir de finos de un carbón del Valle del Cauca. (Pregrado). Universidad del Valle.
- Sharma, Mahesh & Sarkar, Chandan. (2018). Utilization of coke fines in sintering of iron ore with higher micro-fines.

- Tamayo, C. (2012). Construcción de un modelo de mezcla de carbones colombianos para la producción de coque. Aplicación de análisis petrográficos, reológicos y termogravimétricos (Pregrado). Universidad Nacional de Colombia.
- Tripathi, A. K., Iyer, P., & Kandpal, T. C. (1998). A techno-economic evaluation of biomass briquetting in india. *Biomass and Bioenergy*, 14(5–6), 479–488. [https://doi.org/10.1016/s0961-9534\(97\)10023-x](https://doi.org/10.1016/s0961-9534(97)10023-x)
- U.P.M.E. (2020). Carbon. U.P.M.E. <http://www1.upme.gov.co/simco/Cifras-Sectoriales/Paginas/carbon.aspx>
- Yildirim, M., & Ozbayoglu, G. (2002). Environmentally Sound Coal-Derived Binder for Coal Briquetting. *Coal Preparation*, 22(5), 269–276. <https://doi.org/10.1080/07349340215013>