

EVALUACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE UNA SUSPENSIÓN CARBÓN-AGUA
A NIVEL LABORATORIO COMO COMBUSTIBLE PARA LA EMPRESA
INDUSTRIAS MAGMA S.A

CARLOS EDUARDO ESPINOSA RUÍZ
JHON ALEJANDRO ROMERO MORALES

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

EVALUACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE UNA SUSPENSIÓN CARBÓN-AGUA
A NIVEL LABORATORIO COMO COMBUSTIBLE PARA LA EMPRESA
INDUSTRIAS MAGMA S.A

CARLOS EDUARDO ESPINOSA RUÍZ
JHON ALEJANDRO ROMERO MORALES

Trabajo integral de grado para optar el título de
INGENIERO QUÍMICO

Director
Manuel Alejandro Mayorga Betancourt
Ingeniero Químico

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

Nota de Aceptación:

Firma Asesor

Firma Jurado 1

Firma Jurado 2

Bogotá, D.C, (13/07/2016)

DIRECTIVAS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la universidad y Rector del claustro

Dr. Jaime Posada Díaz

Vicerrector de Desarrollo y Recursos Humanos

Dr. Luís Jaime Posada García-Peña

Vicerrectora Académica y de Posgrados

Dra. Ana Josefa Herrera Vargas

Secretario General

Dr. Juan Carlos Posada García-Peña

Decano facultad de Ingenierías

Dr. Julio César Fuentes Arismendi

Director Programa de Ingeniería Química

Ing. Leonardo de Jesús Herrera Gutiérrez

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

Agradezco principalmente a mi familia ya que sin ellos yo no hubiera llegado hasta este punto en mi vida.

A mi compañero que pese a los diversos conflictos que tuvimos en la realización de este trabajo de grado pudimos culminarlo satisfactoriamente.

Y finalmente a todas esas personas que me acompañaron en estos años de carrera que gracias a ellos los disfrute al máximo.

CARLOS

A mis padres que con su esfuerzo y dedicación permitieron que este logro fuera posible.

A mi compañero por soportar cada uno de los problemas e inconvenientes presentados a lo largo de este proceso.

A mis hermanos por su apoyo durante esta etapa de mi vida.

JHON

AGRADECIMIENTOS

A ELIZABETH TORRES, Ingeniera Química por sus consejos y recomendaciones a lo largo de este proyecto.

A MANUEL ALEJANDRO MAYORGA, Ingeniero Químico por su apoyo incondicional y asesorías durante el desarrollo del proyecto.

CONTENIDO

| | pág. |
|--|------|
| INTRODUCCIÓN | 21 |
| OBJETIVOS | 22 |
| 1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS | 23 |
| 1.1 CARBÓN | 23 |
| 1.1.1 Origen | 23 |
| 1.1.2 Composición. | 24 |
| 1.1.3 Propiedades. | 25 |
| 1.1.4 Carbón térmico y metalúrgico | 26 |
| 1.1.5 Clasificación | 27 |
| 1.2 SURFACTANTES COMO DISPERSANTES | 29 |
| 1.2.1 Clasificación | 29 |
| 1.3 SUSPENSIONES | 31 |
| 1.3.1 Suspensiones carbón-agua (CWS) | 32 |
| 1.3.2 Aditivos. | 32 |
| 2. MATERIALES Y MÉTODOS | 34 |
| 2.1 SELECCIÓN TEÓRICA DE MATERIAS PRIMAS | 34 |
| 2.1.1 Carbón mineral | 34 |
| 2.1.2 Aditivos para CWS | 38 |
| 2.2 EQUIPOS | 41 |
| 2.3 RUTA DE PROCESO CWS | 44 |
| 2.3.1 Proceso de trituración y molienda | 45 |
| 2.3.2 Análisis granulométrico | 45 |
| 2.3.3 Obtención de CWS | 45 |
| 2.4 CARACTERIZACIÓN DEL COMBUSTIBLE | 45 |
| 2.4.1. Prueba de Viscosidad Aparente | 46 |
| 2.4.2 Prueba de Gravedad Especifica | 47 |

| | |
|--|----|
| 2.4.3 Prueba de pH | 48 |
| 2.4.4 Prueba de Punto de Fluidéz | 49 |
| 2.4.5 Prueba de Poder Calorífico | 50 |
| 2.5 DISEÑO DE EXPERIMENTOS | 52 |
| 2.5.1 Factores y niveles | 52 |
| 2.5.2 Modelo Factorial 2k | 56 |
| 3. DESARROLLO EXPERIMENTAL | 58 |
| 3.1 RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE CARACTERIZACIÓN | 58 |
| 3.1.1 Viscosidad Aparente | 58 |
| 3.1.2 Gravedad específica | 68 |
| 3.1.4 Punto de fluidez | 69 |
| 3.1.5 Poder calorífico | 69 |
| 3.2 RESULTADOS DISEÑO DE EXPERIMENTOS | 69 |
| 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS | 71 |
| 4.1 PRUEBA DE VISCOSIDAD APARENTE | 71 |
| 4.2 PRUEBA DE GRAVEDAD ESPECÍFICA | 73 |
| 4.3 PRUEBA DE PH | 73 |
| 4.4 PRUEBA PUNTO DE FLUIDEZ | 74 |
| 4.5 PRUEBA PODER CALORÍFICO | 75 |
| 4.6 INFLUENCIA DE VARIABLES SOBRE VISCOSIDAD. | 76 |
| 4.6.1 Análisis de varianza | 76 |
| 4.6.2 Prueba de hipótesis | 76 |
| 4.6.3 Regresión | 78 |
| 4.6.4 Representación gráfica | 79 |
| 5. CONCLUSIONES | 80 |
| 6. RECOMENDACIONES | 82 |
| BIBLIOGRAFIA | 83 |
| ANEXOS | 86 |

LISTA DE TABLAS

| | pág. |
|---|------|
| Tabla 1. Clasificación carbones minerales según norma ASTM D 388 | 27 |
| Tabla 2. Comparación de criterios en matriz de pares | 35 |
| Tabla 3. Comparación de costos respecto a tipos de carbón | 36 |
| Tabla 4. Comparación de disponibilidad respecto a tipos de carbón | 36 |
| Tabla 5. Comparación de poder calorífico entre tipos de carbón | 36 |
| Tabla 6. Matriz de selección final | 37 |
| Tabla 7. Características carbón bituminoso tipo B | 37 |
| Tabla 8. Comparación de criterios en matriz de pares | 38 |
| Tabla 9. Comparación de costos respecto a tipos de aditivo | 39 |
| Tabla 10. Comparación de disponibilidad respecto a tipos de aditivos | 39 |
| Tabla 11. Matriz de selección final | 39 |
| Tabla 12. Intervalo de valores de variables a analizar | 54 |
| Tabla 13. Cantidad de materias primas para formulación de CWS | 55 |
| Tabla 14. Corridas de operación para cada ensayo de viscosidad aparente. | 55 |
| Tabla 15. Resultados de viscosidad de blancos | 58 |
| Tabla 16. Resultados de viscosidad de muestra original y replica con 50% de carbón y 0,8% NaOH. | 60 |
| Tabla 17. Resultados de viscosidad de muestra original y replica con 50% de carbón y 0,8% de ácido cítrico. | 60 |
| Tabla 18. Resultados de viscosidad de muestra original y replica con 50% de carbón y 1% NaOH. | 61 |
| Tabla 19. Resultados de viscosidad de muestra original y replica con 50% de carbón y 1% de ácido cítrico. | 62 |
| Tabla 20. Resultados de viscosidad de muestra original y replica con 55% de carbón y 0,8% NaOH. | 63 |
| Tabla 21. Resultados de viscosidad de muestra original y replica con 55% de carbón y 0,8% de ácido cítrico. | 64 |
| Tabla 22. Resultados de viscosidad muestra y replica con 55% de Carbón y 1% NaOH. | 65 |
| Tabla 23. Resultados de viscosidad muestra y replica con 55% de Carbón y 1% Ácido Cítrico | 66 |
| Tabla 24. Resultados de densidad con picnómetro para muestras de CWS. | 68 |
| Tabla 25. Gravedad específica de las muestras de CWS. | 68 |
| Tabla 26. Distintos pH para las muestras de CWS. | 68 |
| Tabla 27. Punto de fluidez de las muestras de CWS. | 69 |
| Tabla 28. Poder calorífico CWS. | 69 |

| | |
|--|----|
| Tabla 29. Corridas diseño de experimentos para CWS del tipo 2 ³ . | 70 |
| Tabla 30. Porcentajes de disminución de viscosidad aparente. | 72 |
| Tabla 31. Porcentaje de pérdidas de energía | 75 |
| Tabla 32. Análisis de varianza CWS. | 76 |
| Tabla 33. Porcentaje de error entre datos teóricos y experimentales | 79 |

LISTA DE CUADROS

| | pág. |
|--|-------------|
| Cuadro 1. Comparación entre carbón térmico y metalúrgico | 26 |
| Cuadro 2. Propiedades de las mezclas | 31 |
| Cuadro 3. Algunos aditivos para CWS | 33 |
| Cuadro 4. Propiedades relevantes del ácido cítrico en suspensiones carbón-agua | 40 |
| Cuadro 5. Propiedades relevantes de hidróxido de sodio en suspensiones carbón-agua | 40 |
| Cuadro 6. Listado de equipos | 41 |

LISTA DE GRÁFICAS

| | pág. |
|---|------|
| Gráfica 1. Cambios de viscosidad respecto a la velocidad de cizalla para el blanco de 50%. | 59 |
| Gráfica 2. Cambios de viscosidad respecto a la velocidad de cizalla para el blanco de 55%. | 59 |
| Gráfica 3. Cambios de viscosidad respecto a la velocidad de cizalla con 50% de carbón y 0,8% NaOH. | 60 |
| Gráfica 4. Cambios de viscosidad respecto a la velocidad de cizalla con 50% de Carbón y 0,8% Ácido Cítrico. | 61 |
| Gráfica 5. Cambios de viscosidad respecto a la velocidad de cizalla con 50% de Carbón y 1% NaOH. | 62 |
| Gráfica 6. Cambios de viscosidad respecto a la velocidad de cizalla con 50% Carbón y 1% Ácido Cítrico. | 63 |
| Gráfica 7. Cambios de viscosidad respecto a la velocidad de cizalla con 55% de Carbón y 0,8% NaOH. | 64 |
| Gráfica 8. Cambios de viscosidad respecto a la velocidad de cizalla con 55% de carbón y 0,8% ácido cítrico. | 65 |
| Gráfica 9. Cambios de viscosidad respecto a la velocidad de cizalla con 55% de Carbón y 1% de NaOH | 66 |
| Gráfica 10. Cambios de viscosidad respecto a la velocidad de cizalla con 55% de Carbón y 1% Ácido Cítrico. | 67 |
| Gráfica 11. Relación viscosidad aparente contra la velocidad de cizalla a dos concentraciones de carbón para las muestras de CWS con 1% de ácido cítrico. | 71 |
| Gráfica 12. Grafica de contorno que relaciona la viscosidad aparente con la concentración de aditivo y carbón para el aditivo ácido cítrico | 79 |

LISTA DE FIGURAS

| | pág. |
|---|-------------|
| Figura 1. Poder calorífico de los diferentes tipos de carbón | 28 |
| Figura 2. Diagrama de proceso para la preparación de CWS | 44 |
| Figura 3. Diagrama de proceso para la prueba de viscosidad aparente | 46 |
| Figura 4. Diagrama de proceso para la prueba de gravedad específica | 47 |
| Figura 5. Diagrama de proceso para la prueba de pH | 48 |
| Figura 6. Diagrama de proceso de la prueba de punto de fluidez | 49 |
| Figura 7. Esquema del interior de una bomba calorimétrica | 50 |
| Figura 8. Diagrama de proceso para la prueba de poder calorífico | 51 |
| Figura 9. Notación para las diferentes corridas del diseño 2^3 | 56 |
| Figura 10. Representación gráfica del diseño factorial 2^3 | 57 |
| Figura 11. Distribución F para diseños factoriales | 78 |

LISTA DE ECUACIONES

| | pág. |
|--|-------------|
| Ecuación 1. Fórmula para determinar la gravedad específica del CWS | 47 |
| Ecuación 2. Ejemplo para determinar el efecto de los factores | 57 |
| Ecuación 3. Teorema del punto medio | 69 |
| Ecuación 4. Porcentaje de energía perdida | 75 |
| Ecuación 5. Regresión para las muestras de CWS | 78 |

LISTA DE ANEXOS

| | pág. |
|---|-------------|
| Anexo A. Evidencias fotográficas preparación cws | 87 |
| Anexo B. Resultados de caracterización de carbón y poder calorífico del cws | 90 |
| Anexo C. Costos | 94 |
| Anexo D. Fichas de seguridad de los aditivos | 97 |
| Anexo E. Muestra de cálculos | 100 |

LISTA DE ABREVIATURAS

μm . Micrómetro

CWS. Coal wáter slurry (Suspensiones carbón-agua)

mm. Milímetro

RPM. Revoluciones por minuto

cP. Centipoise

G_s . Gravedad específica

ρ . Densidad

ml. Mililitro

% EPE. Porcentaje de energía perdida en evaporación

aq. Disolución acuosa

Cal. Caloría

Kg. Kilogramo

GLOSARIO

ATOMIZACIÓN: proceso mediante el cual un material es desintegrado en partículas más pequeñas, por lo general este proceso es utilizado para obtener polvo de metales pesados y aleaciones.

COQUE: es un combustible sólido producto de la destilación de carbón bituminoso al ser sometido a un calentamiento a altas temperaturas, sin tener contacto con la atmosfera.

EFFECTO ESTÉRICO: efecto causado por un grupo funcional presente en una molécula en el curso de una reacción química.

FLOCULACIÓN: proceso mediante el cual con la ayuda de sustancias denominadas floculantes se logra aglutinar diversas sustancias presentes en un medio disperso para facilitar su separación de este último.

FLUIDO PSEUDOPLASTICO: fluido no newtoniano que se caracteriza por la disminución de su viscosidad y el aumento del esfuerzo cortante con el cambio de la velocidad de cizalla.

HIDROFOBICIDAD: ocurre cuando una molécula no es capaz de interaccionar con las moléculas de agua ni por interacciones ión-dipolo ni mediante puentes de hidrógeno, se dice que la molécula es inmisible en agua.

PUNTO DE FLUIDEZ: temperatura mínima a la cual una sustancia pierde sus propiedades para fluir debido a que adquiere propiedades de un semisólido.

REOLOGÍA: rama de la física que estudia la relación entre la deformación y el esfuerzo en una sustancia que tiene la capacidad de fluir a unas condiciones de temperatura y presión determinadas. Las propiedades que determina esta ciencia se pueden medir con un reómetro.

VELOCIDAD DE CIZALLA: es la tasa de deformación de un fluido con respecto al tiempo.

VISCOSIDAD APARENTE: la viscosidad de un fluido no newtoniano medida a una determinada velocidad de corte y a una temperatura fija. Para que una medición de la viscosidad aparente sea significativa, la velocidad de corte debe ser expresada o definida.

RESUMEN

La formulación de una suspensión carbón-agua como combustible requiere establecer una serie de variables de proceso que intervienen en las características finales del combustible, de manera que se realiza una revisión bibliográfica referente a las variables más representativas y a partir de este análisis se establecen las posibles materias primas y condiciones de proceso.

Con el conocimiento teórico se seleccionan las materias primas (hidróxido de sodio y ácido cítrico) confrontando las ventajas y desventajas en cuanto a costos y disponibilidad. Las variables de proceso se escogen teniendo en cuenta lo reportado en diferentes fuentes bibliográficas, donde finalmente la concentración de carbón y aditivo, así como el tipo de aditivo representan el objeto de estudio en la preparación de CWS.

La preparación del combustible implica como paso previo un proceso de acondicionamiento del carbón bituminoso. Esto es una etapa de trituración y molienda junto a un secado y tamizado hasta obtener un tamaño de partícula de 63 μm . Posteriormente tanto el carbón como los aditivos se adicionan a determinadas cantidades de agua hasta formar una suspensión que es sometida a un proceso de mezclado durante 20 minutos con el fin de asegurar homogeneidad.

Una vez preparadas las suspensiones es necesario realizar caracterización, en este paso se establece la viscosidad como una variable a medir a través de un viscosímetro Brookfield a diferentes velocidades de cizalla teniendo en cuenta que se trata de un fluido no newtoniano. De acuerdo a los resultados obtenidos se escogen tres muestras en las que la viscosidad sea mínima, requisito en todo CWS para efectos de bombeo y atomización en calderas o motores. Las muestras seleccionadas se someten a pruebas de poder calorífico, punto de fluidez, densidad y pH.

En base a los resultados obtenidos en la caracterización se definen y exponen cuales son las mejores combinaciones de variables en las que la viscosidad aparente es mínima, de lo cual se proponen criterios para la selección adecuada de las condiciones de proceso.

Palabras claves: CWS, fluido no newtoniano, carbón bituminoso, viscosímetro Brookfield y aditivo.

INTRODUCCIÓN

Por la existente crisis energética que se presenta en varios países que se basan principalmente en el uso de combustibles fósiles, el uso y descubrimiento de combustibles alternativos como el CWS cobra una gran importancia para dar respuesta a esta problemática.

En Colombia se calculan reservas de gas natural exploradas hasta aproximadamente el 2020 lo que podría generar en un futuro cercano la difícil obtención de dicho combustible, aumentando los costos del gas natural. El CWS se utiliza en la actualidad en China, país que posee grandes reservas de carbón a pesar de que este en su mayoría tiene lignito, que es el tipo de carbón con la menor cantidad de carbono de todos (36-45%), así como una gran cantidad de impurezas. Al ser Colombia el país en Latinoamérica con las mayores reservas carboníferas, el CWS es una gran opción para dar frente a la crisis existente siendo una alternativa fácil de producir y económica ante los combustibles fósiles.

Este combustible es utilizado como fuente de energía en calderas de varios sectores industriales como las termoeléctricas y las metalúrgicas. Así mismo es utilizado en motores de combustión de vehículos militares y helicópteros donde se requiere un combustible no explosivo con buenas propiedades reológicas, además de que no necesita grandes porcentajes de carbón.

El objetivo de este proyecto es evaluar la producción de CWS a nivel laboratorio como combustible para la empresa industrias magma SA, en donde dicha empresa tiene interés en utilizar el CWS como sustituto del gas natural previniendo la escasez de este último en un futuro cercano.

Para el cumplimiento de dicho objetivo se plantea una metodología que consiste en seleccionar el carbón y aditivos adecuados para la obtención de la suspensión seguido de una trituración y molienda del carbón al cual se le realiza un análisis granulométrico. El carbón pulverizado, el agua y los aditivos se mezclan en cantidades determinadas obteniéndose así el CWS. Posteriormente el combustible es sometido a diversas pruebas de caracterización, que son viscosidad aparente, gravedad específica, pH, punto de fluidez y poder calórico. Finalmente se realiza un diseño de experimentos para analizar la relación funcional entre las variables para la producción del combustible con la viscosidad aparente.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Evaluar la producción de CWS a nivel laboratorio como combustible en la empresa industrias magma S.A

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar las características y costos de las materias primas a utilizar
- Establecer las condiciones de proceso para obtener CWS
- Determinar las características fisicoquímicas del combustible obtenido

1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

1.1 CARBÓN

El carbón es un combustible fósil. Es una roca combustible, sedimentaria y de origen orgánico, compuesta principalmente por carbono, hidrogeno y oxígeno. Se formó a partir de la vegetación, que se ha ido consolidado entre otros estratos de roca y se ha alterado por los efectos combinados de la presión y el calor a lo largo de millones de años para acaba formando las vetas de carbón.¹

1.1.1 Origen². El carbón son los restos alterados de la vegetación prehistórica que se acumularon originalmente en pantanos y ciénagas.

Depósitos de lodos y sedimentos junto con los movimientos en la corteza terrestre enterraron estos pantanos y ciénagas hasta grandes profundidades, este material vegetal se sometió a altas temperaturas y presiones lo que provoco diversos cambios físicos y químicos en la vegetación lo que dio origen a la turba y posterior a ello el carbón.

Secuencias sedimentarias que contienen carbón y lechos de turba son encontradas a lo largo del mundo en un rango de edades desde el paleozoico superior hasta la actualidad.

La formación de carbón se inició durante el periodo carbonífero que comprende desde hace 300 millones de años a hace 200 millones de años. La calidad de los distintos tipos de depósitos de carbón se evalúa por la temperatura y presión, así como por el tiempo de formación. Inicialmente la turba se transforma en lignito o comúnmente llamado carbón marrón los cuales presentan una composición orgánica baja en comparación con otros tipos de carbones.

A lo largo del tiempo los efectos de temperatura y presión han producido cambios en el lignito aumentando progresivamente su madurez orgánica y finalmente transformándolo en otro tipo de carbón denominado subbituminoso. Continuaron produciéndose más cambios físicos y químicos hasta tal punto que los carbones se hicieron más duros y negros lo que dio origen a los carbones bituminosos. En ciertas condiciones adecuadas se dio un aumento de la madurez orgánica lo que produjo

¹ MILLER ,Bruce G. Coal Energy Systems. En: RICHARD C. DORF. Introduction to Coal. Estados Unidos: Academic Press, 2004. p. 1-2.

² World Coal Association. The Coal Resources: A Comprehensive Overview of Coal. [en línea]. Putney, London. 2005. [Consultado el 21 septiembre de 2015]. Disponible en: <https://www.worldcoal.org/coal/what-coal>.

finalmente la antracita. Es un hecho, sin embargo, que el origen de carbón se ha estudiado durante más de un siglo y que ningún modelo se ha identificado que puede predecir la aparición de este.

1.1.2 Composición. El carbón está compuesto por cuatro partes principales que son:

- Vitreno: tiene un lustre vítreo brillante, se parte con fractura concoidea y es muy bajo en contenido de cenizas. El vitreno es negro, frágil y las cenizas son de color crema o púrpura. Generalmente es muy reactivo y está constituido básicamente por vitrina.
- Clareno: semibrillante, negro y ligeramente estratificado. Es reactivo y se encuentra constituido por vitrina y exinita.
- Dureno: mate, negro o negro grisáceo, duro, áspero, además de ser inerte y se encuentra constituido por inertinita.
- Fuseno: sedoso, negro, fibroso, friable e inerte y constituido por inertinita³.

Contenido de cenizas: el carbón extraído se compone de sustancia carbonosa unida a componentes inorgánicos y cierta cantidad de materias terrosas. Aquellos componentes inorgánicos que no son visibles a simple vista se pueden localizar mediante rayos X, debido a que el carbón resulta transparente a estos rayos mientras que la materia inorgánica (cenizas) resulta opaca.

Se puede considerar las cenizas como material incombustible del carbón. Las cenizas son la materia inerte del carbón y en exceso disminuyen el valor de poder calorífico.

Oxígeno: el oxígeno presente en el carbón afecta sus propiedades, un aumento significativo de este reduce el poder calorífico.

Nitrógeno: este puede variar entre 1 y 2,5%. El nitrógeno junto con el nitrógeno del aire para combustión, es uno de los causantes de las emisiones de los NOx. Los NOx térmicos son una función de la temperatura de llama. Controlar los niveles de nitrógeno pueden ser procesos demasiado costosos para implementar.

Azufre: en el carbón se encuentra en forma de pirita, como compuestos orgánicos y como sulfatos. En algunos casos es necesario determinar la cantidad de azufre

³ Universidad Industrial de Santander. BOLETÍN DE GEOLOGÍA. En: PUBLINDEX. 2009.vol. 25, no. 41, p. 6-18.

fijo debido a que algunas veces puede exceder el 5%. Generalmente el contenido es inferior al 0,5%.

Gases: principales gases que son absorbidos por el carbón son el metano e hidrocarburos saturados. Los cuales representan el contenido de volátiles.

1.1.3 Propiedades. De un carbón a otro las propiedades físicas varían y estas influyen en el manejo de los mismos, gran parte de los carbones se hinchan al someterlos a altas temperaturas; este factor se denomina número de hinchamiento en crisol o índice de hinchamiento libre, cuando dicho número de hinchamiento es superior a 3 o 4 se puede producir problemas con la combustión en rejilla al menos que se trate de un cargador con un diseño especial.

Algunas de las propiedades físicas más importantes del carbón mineral son:

- Poder calorífico. Representa la cantidad de calor que se libera en combustión completa por cada unidad de carbón quemado. Esta propiedad varia en gran medida entre los carbones y esta diferencia se presenta debido al porcentaje de volátiles y carbono; así mismo puede influir en los requisitos del equipo como también en su almacenamiento.
- Humedad. Existen dos clases de humedad en el carbón que son la humedad inherente y libre. La humedad inherente es la que está presente en la estructura del carbón y dependerá de este, la libre es aquella que el carbón obtiene del ambiente y se deposita en la superficie y a diferencia de la inherente se puede eliminar mediante procesos de secado. A medida que la humedad aumenta se requerirá una capacidad y costo mayor en el equipo de combustión y así mismo para el manejo, almacenamiento y pulverización del carbón.
- Tamaño. El tamaño de partícula es importante con respecto a procesos en donde se pueda presentar abrasión y obstrucciones en el sistema de manejo, para la combustión presente en pilas y también para el rendimiento del pulverizador. El tamaño máximo de carbón que se alimenta a un pulverizador suele estar entre 19 y 75 mm.
- Contenido de volátiles. Este factor es de vital importancia en la combustibilidad del carbón pulverizado. La finura que se requiere es mayor conforme se reduce el contenido de volátiles y proporcionalmente se requiere pulverizadores de mayor rendimiento. En los carbones de bajo contenido de volátiles se requiere mayor tiempo de combustión por lo que se inflaman con menor facilidad.

- Triturabilidad. Es la capacidad del carbón para que pueda ser pulverizado y esto está relacionado con la capacidad del sistema de reducción de tamaño.
- Abrasividad. Es el desgaste por rozamiento o fricción que se produce en un material. La abrasividad del carbón afecta principalmente a los pulverizadores y a los sistemas de transporte de carbón pulverizado. No existe una relación entre la triturabilidad y abrasividad.
- Combustión. El proceso de combustión incluye la formación de CO₂, la formación y combustión subsecuente de CO y la combustión de volátiles. Este proceso depende de diferentes factores como el tiempo de residencia, temperatura, cantidad y tipo de alimento, distribución y turbulencia de aire⁴.

1.1.4 Carbón térmico y metalúrgico. Carbón bituminoso utilizado industrial para la generación de energía en diversos sectores como empresas de servicio públicos. Básicamente su uso es en la producción de calor.

Es el carbón utilizado en el área siderúrgica para la producción de coque. Los carbones coquizables deben tener bajo contenido de azufre y fosforo y por su escasez generalmente son más costos que el térmico.

Cuadro 1. Comparación entre carbón térmico y metalúrgico

| Parámetro | Comparación carbón térmico y metalúrgico |
|---------------------|--|
| Usos | Carbón térmico utilizado para generación de energía y el metalúrgico en la producción de coque debido a su composición. |
| Costo | Los costos del carbón térmico son variables dependiendo composición, en contraste con los metalúrgicos que presentan un costo más elevado. |
| Contenido volátiles | Carbón térmico con un contenido variable y el metalúrgico con un contenido por lo general superior. |
| Humedad | Carbón térmico con mayor porcentaje que el carbón metalúrgico. |
| Azufre | Carbón térmico posee generalmente mayores porcentajes. |
| Cenizas | Ninguno presenta una diferencia considerable, se puede decir que el porcentaje es variable |
| Contenido Carbón | Carbón metalúrgico presenta mayor contenido de carbón. |

⁴ Catamutún. Carbón. [en línea]. región de los ríos, chile. 2015. [Consultado el 25 de septiembre de 2015]. Disponible en: <http://rgantzw.wix.com/catamutun>.

1.1.5 Clasificación. La combustión del carbón es un proceso bastante complejo, es por ello que es necesario caracterizar el carbón mediante parámetros que sean fácilmente medibles que permitan evaluar su valor térmico. Los carbones se clasifican en cuatro grandes sistemas que están estandarizados internacionalmente de acuerdo a la norma ASTM D 388. Esta clasifica los carbones en base al contenido de carbono, material volátil y poder calorífico.

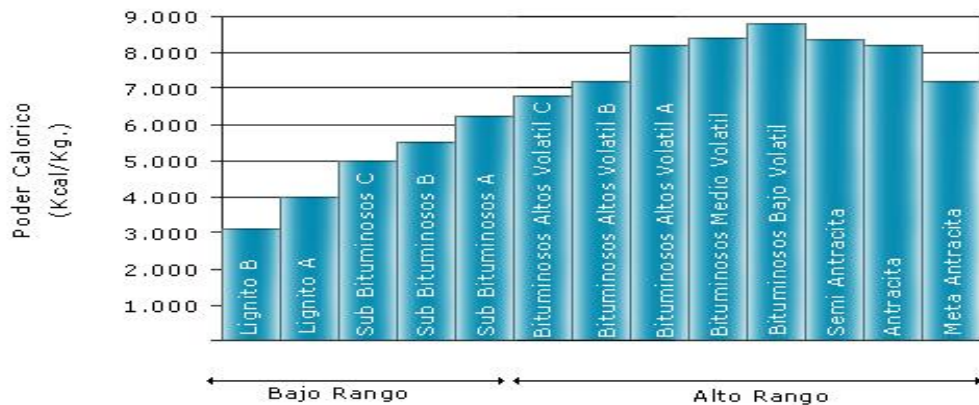
Tabla 1. Clasificación carbones minerales según norma ASTM D 388

| Categoría | Sub-categoría | Elementos volátiles % | PCS (Btu/lb) | Carbono fijo % |
|----------------|----------------------|-----------------------|----------------------------|----------------|
| Antracita | Meta-Antracita | < 2 | - | ≥ 98 |
| | Antracita | 2 a 8 | - | 92 a 98 |
| | Semi-Antracita | 8 a 14 | - | 86 a 92 |
| Bituminoso | Bajo nivel volátil | 14 a 22 | - | 78 a 86 |
| | Medio nivel volátil | 22 a 31 | - | 69 a 78 |
| | Alto nivel volátil A | > 31 | >14,000 | - a 69 |
| | Alto nivel volátil B | - | 13,000–14,000 | - |
| | Alto nivel volátil C | - | 10,500–13,000 | - |
| | Sub-Bituminoso A | - | 10,500–11,500 ^c | - |
| Sub-Bituminoso | Sub-Bituminoso B | - | 9500–10,500 | - |
| | Sub-Bituminoso C | - | 8300–9500 | - |
| | Lignito A | - | 6300–8300 | - |
| Lignito | Lignito B | - | <6300 | - |

Fuente: ASTM D388: Standard Clasificación of Coals by Rank

Generalmente las antracitas tienen un carácter no aglomerante, los carbones bituminosos comúnmente aglomerantes con excepción de los bituminosos con altos volátiles tipo C que son siempre aglomerantes y finalmente carbones sub-bituminosos y lignitos que no tienen un carácter aglomerante.

Figura 1. Poder calorífico de los diferentes tipos de carbón



Fuente: carbón [citado el 20 septiembre de 2015]. Disponible en: <http://www.catamutun.com/produccion/carbon/master.html>

- Antracita. Carbón duro con alto contenido de carbono (86 a 98 %), bajo contenido de volátiles y poder calorífico superior a 14000 BTU/lb. Usado para generar calor en la industria térmica y siderúrgica, también es usado en la fabricación de goma sintética, colorantes y purificación de agua.
- Carbón bituminoso. Posee un menor contenido de carbono que las antracitas y poder calorífico levemente superior. Son usados en procesos de obtención de acero y carbones térmicos; generalmente son usados en la generación de energía.
- Carbón sub-bituminoso. De acuerdo a la clasificación estos presentan un menor poder calorífico que los carbones bituminosos, su composición de carbono esta entre 35% y 45%, tienen grandes cantidades de material volátil.
- Lignito. Son carbones con alta humedad y alto contenido de cenizas y de material volátil, todas estas propiedades hacen que tengan un bajo poder

calorífico. Son empleados para calefacciones, energía eléctrica, joyería y objetos decorativos⁵.

1.2 SURFACTANTES COMO DISPERSANTES

Un anfifilo es cualquier sustancia que posee a nivel estructural una parte Liófila o hidrófila (grupo polar) y una parte liofoba o hidrófoba (por lo general una cadena carbonada).

Un surfactante o tensoactivo son sustancias anfifílicas que tienen la capacidad de alterar la superficie de otra sustancia. La estructura anfifílica de los agentes tensoactivos es responsable de su tendencia a concentrarse en las interfaces y a agregarse en soluciones en diversas estructuras supramoleculares, tales como micelas y bicapas. Dependiendo del grupo polar los surfactantes se pueden clasificar en no iónicos, aniónicos, y catiónicos. Estas sustancias son ampliamente utilizadas en diversidad de procesos de formulación y son la base de los jabones y detergentes.

1.2.1 Clasificación⁶. Un anfifilo es cualquier sustancia que posee a nivel estructural una parte liófila o hidrófila (grupo polar) y una parte liofoba o hidrófoba (por lo general una cadena carbonada).

Un surfactante o tensoactivo son sustancias anfifilas que tienen la capacidad de alterar la superficie de otra sustancia. La estructura anfifílica de los agentes tensoactivos es responsable de su tendencia a concentrarse en las interfaces y a agregarse en soluciones en diversas estructuras supramoleculares, tales como micelas y bicapas. Dependiendo del grupo polar los surfactantes se pueden clasificar en no iónicos, aniónicos, y catiónicos. Estas sustancias son ampliamente utilizadas en diversidad de procesos de formulación y son la base de los jabones y detergentes.

- Surfactantes no iónicos. Son compuestos anfifílicos, es decir que poseen un extremo hidrofílico (soluble en agua) y otro hidrófobo (insoluble en agua). Estos en solución acuosa no se disocian en iones por que poseen grupos hidrófilos como alcohol, fenol, éter o amida, sin embargo, algunos compuestos son capaces de adquirir carga en función del pH, es el caso de los ácidos carboxílicos de cadena larga que son no iónicos en condiciones neutras y acidas mientras

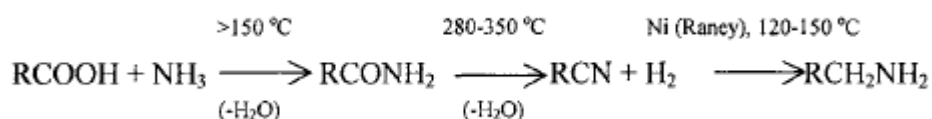
⁵ Imitola Acero, Oscar Uriel. La Cadena del Carbón. Generalidades. Bogotá D.C (Colombia). 2012. ISBN 958-97750-0-4.

⁶ MÖBIUS, R. MILLER, V.B. Chemistry of surfactants. En: Surfactants Chemistry, Interfacial Properties, Applications. 1 ed. Ucrania: MÖBIUS, D. MILLER, R. 2001. p. 1-53.

que son aniónicos en condiciones básicas, esto infiere que los surfactantes no iónicos son aquellos que no poseen carga en el rango de trabajo predominante de pH. Compuestos como alcoholes poliésteres, ésteres y sus combinaciones pertenecen a este grupo.

- Surfactantes catiónicos. Su molécula puede disociarse en solución formando un catión activo de superficie y un anión. De acuerdo a su estructura química estos se subdividen principalmente en: alquil aminas, aminas etoxiladas, alquil imidazolinias; los surfactantes catiónicos generalmente no proporcionan una limpieza eficaz y por tanto no se utilizan en los detergentes de uso general. Algunos ejemplos de uso se pueden ver en fungicidas, herbicidas, suavizantes de tejidos, acondicionadores de cabello, dispersantes de asfalto, agentes de flotación, inhibidores de corrosión y dispersantes para hidrocarburos.

Las aminas primarias y sus sales se derivan de grasas y aceites naturales a través de los ácidos grasos, amidas de ácidos y nitrilos de ácidos como intermedios:



- Surfactantes Anionicos. Los tensoactivos aniónicos son sustancias anfífilas los cuales están constituidos por un grupo aniónico unido directamente o a través de productos intermedios a una cadena hidrocarbonada larga. Entre las características que poseen este tipo de surfactante se encuentra la capacidad de dispersión, alta formación de espuma, la sensibilidad a la dureza del agua y la desnaturalización de proteínas.

En solución acuosa los surfactantes aniónicos forman aniones de superficie activa y cationes hidratados del tipo amonio:



A este tipo pertenecen los detergentes sintéticos como los alquil benceno sulfonatos, los jabones (sales de sodio de ácidos grasos), los agentes espumantes como el lauril sulfato, los humectantes del tipo sulfosuccinato, los dispersantes del tipo lignosulfonatos, etc.

1.3 SUSPENSIONES

Son todas aquellas mezclas heterogéneas que se dan en escala macroscópica, esto quiere que las partículas de la fase dispersa son tan grandes que se pueden ver a simple vista. En promedio estas partículas tienen un tamaño superior a $1\ \mu\text{m}$. En este tipo de mezclas la fase dispersa permanece suspendida en la fase dispersora por un tiempo determinado, después del cual las partículas se sedimentan dependiendo del tamaño de partícula y la diferencia de densidades entre las fases.

Las suspensiones deben diferenciarse de otras mezclas como las disoluciones y coloides que contrastan en algunas propiedades como la homogeneidad y transparencia. La principal diferencia entre las suspensiones y demás mezclas se da en el tamaño de partícula de los sólidos.

Cuadro 2. Propiedades de las mezclas

| Propiedades | disoluciones | Coloide | Suspensión |
|---------------------------|---------------------------|-------------------------------------|---|
| Tamaño partícula | 0.1-1.0 nm | 1.0 nm— $1\ \mu\text{m}$ | $>1\ \mu\text{m}$ |
| Partículas constituyentes | Iones, átomos o moléculas | Grupos de iones, átomos o moléculas | Grandes grupos de iones, átomos o moléculas |
| Filtro a través de papel | No hay separación | No hay separación | Si hay separación |
| Separación diálisis | No hay separación | Si hay separación | Si hay separación |
| Sedimentación | No | No | Si |
| Transparencia | Transparente | Traslucida | Opaca |
| Homogeneidad | Homogénea | Homogénea | No homogénea |

Fuente: mezclas homogéneas [citado el 20 de septiembre de 2015]. Disponible en: <http://portalacademico.cch.unam.mx/alumno/quimica1/unidad1/mezclas/suspensiones>

1.3.1 Suspensiones carbón-agua (CWS). Combustible formado por partículas finas de carbón que por lo general se busca que posea un elevado poder calorífico como es el caso del carbón térmico; un porcentaje de agua generalmente sin tratamiento alguno y por último posee sustancias que ayudan a variar las propiedades reológicas, de inyección entre otras, llamadas surfactantes en un porcentaje mucho menor a la del carbón y agua. Generalmente la cantidad de carbón en suspensión varía entre el 50 y 70 % y los aditivos entre el 0,2 a 1 %, esto con el fin de evitar propiedades indeseables e inclusive contrarias a las esperadas⁷.

Este tipo de suspensiones deben caracterizarse mediante algunos parámetros como: cenizas, sólidos, material volátil, viscosidad aparente, pH, densidad aparente, poder calorífico, estabilidad entre otros. El CWS es utilizado como recurso energético en la industria.

- Generación de vapor en los sistemas de calderas
- Sistema de energía complementario en los motores diésel cuando el tamaño de partícula de carbón es inferior a 80 micras; como por ejemplo los motores diésel de las plantas de energía marítima o sistemas modulares de baja velocidad pueden funcionar con CWS puro, mientras que los motores diésel de velocidad media pueden necesitar los dos combustibles.
- Se utiliza como combustible en las centrales eléctricas que emplean turbinas de gas de ciclo combinado cuando el tamaño de partícula del carbón abarca de las 5 a 10 micras⁸.

1.3.2 Aditivos. La fricción entre partículas en la suspensión puede reducirse mediante el uso de aditivos llamados surfactantes; estos agentes tensoactivos afectan la viscosidad y la reología de las suspensiones en general. Es importante recordar que el carbón no es una sustancia fuertemente definida puesto que varía en su composición y poder calorífico, por tanto, es importante aclarar que los aditivos seleccionados pueden variar de un carbón a otro. Entre los aditivos más comúnmente usados se encuentran los surfactantes iónicos y catiónicos.

⁷ Mohapatra, SK y Kumar, Satish. Effect of additive on the rheological properties of coal slurry. En: THE PROCEEDINGS OF 28th INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOLID WASTE TECHNOLOGY AND MANAGEMENT. 2013.vol. 1, no. 45, p. 1376-1381.

⁸ Ramachandran, Prakash; TSAI, Ching-Yi y SCHANCHE, Gary W. Use of Cwsf in Compact Boilers. En: An Evaluation of Coal Water Slurry Fuel Burners and Technology. 2nd ed. Estados Unidos: DTIC Document, 1992. 11-13 p.

Cuadro 3. Algunos aditivos para CWS

| Surfactantes aniónicos | Surfactantes no iónicos | Polisacáridos |
|--|---------------------------------------|----------------------------------|
| Ácido etilendiaminotetraacético (EDTA) | Éteres de glicol de polietileno | Sales de Carboximetilcelulosa |
| lignosulfonato de calcio | Polipropilenglicol | Celulosa |
| lignosulfonato de amonio | Alcoholes etoxilados/ propoxilados | Partículas de madera |
| lignosulfonato de sodio | Alquil Fenil Deca etilenglicol | Ácido urónico |
| tripolifosfato de sodio | Éter | Hidroxipropilcelulosa |
| óxido de polialquileno | Polietilenimina | Éter de celulosa |
| sulfonato de estireno polisódico | Polímeros de óxido de Propileno | |
| Ácido poliacrílico | Polímeros de óxido de etileno | |
| Isobutileno | Polímeros de naftaleno butilfenol | |
| Poliacrilamida | Polímeros de ácido metacrílico | |
| Polioxietileno nonil fenol éter | ácido butírico lauril etileno | |
| Ácido sulfónico de polivinilo | sal de diamina | |
| Ácido sulfónico naftaleno | | |

Fuente: Particle Technology and Applications (2012).

2. MATERIALES Y MÉTODOS

En este capítulo se pretende abordar la selección de materias primas de acuerdo a características generales, así como la metodología adecuada para la producción de mezclas carbón-agua (CWS); que incluye las condiciones de operación del proceso y las pruebas mínimas requeridas en la caracterización de un combustible.

2.1 SELECCIÓN TEÓRICA DE MATERIAS PRIMAS

Durante la formulación de CWS se deben seleccionar adecuadamente las materias primas a utilizar mediante algunos criterios como lo son calidad (características), disponibilidad y costos; comparando la importancia de cada uno de ellos.

2.1.1 Carbón mineral. Existen diversos tipos de carbón mineral y dependiendo de sus características tienen distintos usos en la industria. A grandes rasgos de acuerdo a su función se pueden clasificar en carbones térmicos y coquizables (metalúrgicos); el uso de carbones metalúrgicos se limita a la industria siderúrgica y metalúrgica porque se han sometido a procesos de eliminación de impurezas como azufre y material volátil que permite obtener coque, usado en la elaboración de aceros. Los carbones térmicos son utilizados en la generación de energía como por ejemplo en las suspensiones carbón-agua.

Se tiene como objetivo la selección del tipo de carbón de acuerdo a sus propiedades costos y disponibilidad. El departamento de Cundinamarca se caracteriza por producir carbones de alta calidad bituminosos en su mayoría, como lo reporta INGEOMINAS (2004), donde se especifica la disponibilidad de los distintos tipos de carbones⁹ y se clasifican de acuerdo a la norma ASTM D388¹⁰, de esta forma se obtiene los siguientes tipos de carbón para la región:

- Carbón bituminoso de bajos volátiles
- Carbón bituminoso de medios volátiles
- Carbón bituminoso de altos volátiles tipo B
- Carbón bituminoso de altos volátiles tipo C

Las materias primas se determinan a partir de matrices de factores. Los criterios a seleccionar son disponibilidad, costos y entre las características poder calorífico y material volátil.

⁹ Imitola. Op. Cit., p. 38.

¹⁰ ASTM INTERNATIONAL. Standard Classification of Coals by Rank. ASTM D388-12. 12 ed. Washington, D.C.: ASTM. 2012. 7 pág.

Los criterios se juzgan entre sí, asignando los siguientes valores:

10 = Significativamente importante

5 = Más importante

1 = Igual

1/5 = Menos importante

1/10 = Significativamente menos importante

Finalmente se compara cada opción contra todas las demás; es decir se hace un contraste entre los tipos de carbón, asignando los siguientes valores:

10 = Significativamente mejor

5 = Mejor

1 = Igual

1/5 = Peor

1/10 = Significativamente peor

Tabla 2. Comparación de criterios en matriz de pares

| Criterio | Co | Di | PC | MV | Suma | Factor Ponderacion |
|-----------------------|-----|------|-----|-------|------|--------------------|
| Costo (Co) | | 1/10 | 5 | 5 | 10,1 | 0,78 |
| Disponibilidad (Di) | 1 | | 5 | 1 | 7 | 0,54 |
| Poder Calorifico (PC) | 1/5 | 1/5 | | 5 | 5,4 | 0,42 |
| Material Volatil (MV) | 1/5 | 1/10 | 1/5 | | 0,5 | 0,04 |
| | | | | Total | 12,9 | |

De acuerdo a la anterior tabla es evidente que los criterios costo, disponibilidad y poder calorífico obtienen la ponderación más alta a diferencia de la cantidad de material volátil con un factor de ponderación bajo de 0,04, que como consecuencia puede descartarse de los criterios con mayor incidencia.

El poder calorífico del tipo de carbón a seleccionar para preparar suspensiones carbón-agua debe ser mayor a 3502,34 Kcal/Kg, esto indica que es posible utilizar un carbón del tipo lignito, pero es recomendable emplear carbones bituminosos con un calor de combustión superior a 7227,0554 Kcal/Kg y al mismo tiempo mantener un equilibrio con el costo¹¹, puesto que determinara la eficiencia del combustible; así mismo la disponibilidad con un ponderado de 0,54 es un factor relevante porque repercutirá directamente en los costos (gastos adicionales en envíos y transportes).

¹¹ ASTM INTERNATIONAL. Op. Cit., p. 6.

Tabla 3. Comparación de costos respecto a tipos de carbón

| Costo | CBBV | CBMV | CBAVB | CBAVC | Suma | Factor Ponderacion |
|---|------|------|-------|-------|------|--------------------|
| Carbón Bituminoso de Bajos Volátiles (CBBV) | | 1/5 | 1/10 | 1/10 | 0,4 | 0,0098 |
| Carbón Bituminoso de Medios Volátiles (CBMV) | 5 | | 1/5 | 1/5 | 5,4 | 0,1317 |
| Carbón Bituminoso de Altos Volátiles tipo B (CBAVB) | 10 | 5 | | 5 | 20 | 0,4878 |
| Carbón Bituminoso de Altos Volátiles tipo C (CBAVC) | 10 | 5 | 1/5 | | 15,2 | 0,3707 |
| | | | | Total | 41 | |

Los costos de carbones bituminosos de altos volátiles tipo B y C son \$127.780/Kg y \$122.450/Kg, significativamente inferiores a los de carbones de medios y bajos volátiles (\$182.235/Kg y \$280.275/Kg), debido a que no se utilizan con frecuencia en los procesos de producción de acero, donde los carbones más empleados son aquellos en los cuales su cantidad de volátiles es inferior al 2% favoreciendo los procesos de remoción (coquización). Generalmente en CWS se prefieren carbones con altos volátiles que encienden más fácilmente¹². Los costos de los tipos de carbones se encuentran reportados en el anexo C.

Tabla 4. Comparación de disponibilidad respecto a tipos de carbón

| Disponibilidad | CBBV | CBMV | CBAVB | CBAVC | Suma | Factor Ponderacion |
|---|------|------|-------|-------|------|--------------------|
| Carbón Bituminoso de Bajos Volátiles (CBBV) | | 1/5 | 1/10 | 1/10 | 0,4 | 0,0136 |
| Carbón Bituminoso de Medios Volátiles (CBMV) | 5 | | 1 | 1/10 | 6,1 | 0,2068 |
| Carbón Bituminoso de Altos Volátiles tipo B (CBAVB) | 10 | 1 | | 1 | 12 | 0,4068 |
| Carbón Bituminoso de Altos Volátiles tipo C (CBAVC) | 10 | 10 | 1 | | 11 | 0,3729 |
| | | | | Total | 29,5 | |

Los carbones bituminosos de bajos volátiles además de presentar el costo más elevado (\$280.275/Kg), son escasos. En el departamento de Cundinamarca se encuentran en gran abundancia aquellos que poseen un elevado porcentaje de volátiles (tipo B y C).

Tabla 5. Comparación de poder calorífico entre tipos de carbón

| Poder calorífico | CBBV | CBMV | CBAVB | CBAVC | Suma | Factor Ponderacion |
|---|------|------|-------|-------|------|--------------------|
| Carbón Bituminoso de Bajos Volátiles (CBBV) | | 5 | 5 | 10 | 20 | 0,5540 |
| Carbón Bituminoso de Medios Volátiles (CBMV) | 1/5 | | 5 | 5 | 10,2 | 0,2825 |
| Carbón Bituminoso de Altos Volátiles tipo B (CBAVB) | 1/5 | 1/5 | | 5 | 5,4 | 0,1496 |
| Carbón Bituminoso de Altos Volátiles tipo C (CBAVC) | 1/10 | 1/5 | 1/5 | | 0,5 | 0,0139 |
| | | | | Total | 36,1 | |

¹² BARRERA ZAPATA, Rolando; PÉREZ BAYER, Juan F y SALAZAR JIMÉNEZ, Carlos. Carbones colombianos: clasificación y caracterización termoquímica para aplicaciones energéticas. En: REVISTA ION, 2014. Vol. 27, no. 2, ISSN 2145-8480.

Cuando el contenido de cenizas, y humedad inherente en un carbón es insignificante (inferior al 10% y 2% respectivamente), este presenta una cantidad de carbono fijo superior al 69%, lo que ocasiona que el poder calorífico aumente considerablemente como consecuencia de una menor cantidad de residuos¹³. Una hulla bituminosa de bajos volátiles es la mejor opción en cuanto a poder calorífico con un ponderado de 0,55, aun así, se requerirá de un precalentamiento previo para que pueda encender aumentando los costos.

Tabla 6. Matriz de selección final

| Tipo de carbon | Costo | Disponibilidad | Poder Calorífico | Puntaje Final |
|---|-------|----------------|------------------|---------------|
| Carbón Bituminoso de Bajos Volátiles (CBBV) | 0,01 | 0,01 | 0,23 | 0,25 |
| Carbón Bituminoso de Medios Volátiles (CBMV) | 0,10 | 0,11 | 0,12 | 0,33 |
| Carbón Bituminoso de Altos Volátiles tipo B (CBAVB) | 0,38 | 0,22 | 0,06 | 0,67 |
| Carbón Bituminoso de Altos Volátiles tipo C (CBAVC) | 0,29 | 0,20 | 0,006 | 0,50 |

Se obtiene un puntaje final como resultado de multiplicar los factores de ponderación de los criterios y tipos de carbón, donde se selecciona un carbón bituminoso de altos volátiles tipo B por dar un ponderado de 0,67. Cabe resaltar que, aunque sus características son similares a las de un carbón bituminoso de altos volátiles tipo C, este presenta un poder calorífico que está en el rango de 7227,05-7782,98 Kcal/Kg mientras que para un tipo C el rango es de 5837,24-7227,05 Kcal/Kg.

Se obtiene el carbón en una zona de acoplo del municipio de Cogua de la empresa COACPROL LTDA.

Dicho carbón es un carbón bituminoso de altos volátiles tipo B que se clasifica de acuerdo a la norma ASTM 388.

Tabla 7. Características carbón bituminoso tipo B

| Característica | Base Húmeda | Base Seca |
|----------------------------|-------------|-----------|
| % Humedad Total | 1,91 | |
| % Cenizas | 9,43 | 9,62 |
| % Material Volátil | 36,80 | 37,52 |
| % Carbono Fijo | 51,85 | 52,86 |
| % Azufre | 0,91 | 0,93 |
| Poder Calorífico (Kcal/Kg) | 7509,00 | 7655,00 |

¹³ Ibid., p. 45

2.1.2 Aditivos para CWS. Los aditivos comercialmente usados pertenecen a la categoría de surfactantes ya sean aniónicos, catiónicos o no iónicos, cabe resaltar que la eficacia de estos aditivos se debe comprobar experimentalmente por que dependerán del tipo y concentración de carbón.

Para el presente trabajo de investigación se seleccionan cinco aditivos que si bien no son en sí surfactantes comerciales son ampliamente usados como materia prima para la fabricación de ellos.

Por otro lado, se ha demostrado y reportado que el hidróxido de sodio puede actuar como un excelente dispersante y humectante en suspensiones que usan carbones bituminosos¹⁴.

En general la eficacia de un aditivo debe determinarse experimentalmente y considerarse como uno de los objetivos centrales a estudiar en la preparación de suspensiones carbón-agua. En este estudio se considera de vital importancia establecer el poder de dispersión que influye directamente en el aumento o disminución de la viscosidad aparente¹⁵.

La selección adecuada de aditivos se realiza mediante matrices de selección empleando los mismos criterios de ponderación utilizados en la selección del tipo de carbón. Donde los criterios de mayor importancia son el costo y disponibilidad y los aditivos objeto de estudio carbonato de calcio, ácido cítrico lignosulfonato de sodio, hidróxido de sodio y silicato de sodio. El ácido cítrico se recomienda como una alternativa económica sorprendentemente eficaz en gran variedad de lodos¹⁶.

Tabla 8. Comparación de criterios en matriz de pares

| Tipo aditivo | Co | Di | Suma | Factor Ponderación |
|---------------------|----|-------|------|--------------------|
| Costo (Co) | | 1/5 | 0,2 | 0,04 |
| Disponibilidad (Di) | 5 | | 5 | 0,96 |
| | | Total | 5,2 | |

Debido a los bajos costos de la mayoría de aditivos seleccionados la disponibilidad representa el factor más importante. Costos reportados en anexo C.

¹⁴ Sah, B.K; Srivastava, S.B; y Bandopadhyay. Effect of Additives on the Rheological Characteristics of Coal-Water Slurries. En: Venugopal R. Mineral Processing Technology. New Delhi, Sharma T, 2005. p. 267- 274.

¹⁵ Dincer, H., Boylu, F., Sirkeci, A. A., & Ateşok, G. The effect of chemicals on the viscosity and stability of coal water slurries. En: International Journal of Mineral Processing, 2003. P. 41-51.

¹⁶ Klimpel R.R. The selection of wet grinding chemical additives based on slurry rheology control. En: Powder Technology. Noviembre, 1999. Vol. 105, no. 433, p 330- 435.

Tabla 9. Comparación de costos respecto a tipos de aditivo

| Costo | C20H24Na2O10S2 | CaCO3 | Na2SiO3 | C6H8O7 | NaOH | Suma | Factor Ponderación |
|--|----------------|-------|---------|--------|-------|-------|--------------------|
| Lignosulfonato de Sodio (C20H24Na2O10S2) | | 1/5 | 1/5 | 1/10 | 1/10 | 0,6 | 0,0100 |
| Carbonato de Sodio (CaCO3) | 5 | | 1 | 1 | 1/5 | 7,2 | 0,1194 |
| Silicato de Sodio (Na2SiO3) | 5 | 1 | | 1/5 | 1/10 | 6,3 | 0,1045 |
| Acido Citrico (C6H8O7) | 10 | 1 | 5 | | 1/5 | 16,2 | 0,2687 |
| Hidroxido de Sodio (NaOH) | 10 | 5 | 10 | 5 | | 30,00 | 0,4975 |
| | | | | | Total | 60,30 | |

El hidróxido de sodio tiene un costo de 2.040\$/Kg y el ácido cítrico de 3.460\$/Kg, estos presentan los costos más bajos respecto a los demás aditivos, costos que están disponibles en el anexo C. A partir de ello se obtienen los factores de ponderación mayores, los cuales son 0,26 y 0,49 respectivamente.

Tabla 10. Comparación de disponibilidad respecto a tipos de aditivos

| Disponibilidad | C20H24Na2O10S2 | CaCO3 | Na2SiO3 | C6H8O7 | NaOH | Suma | Factor Ponderacion |
|--|----------------|-------|---------|--------|-------|------|--------------------|
| Lignosulfonato de Sodio (C20H24Na2O10S2) | | 1/5 | 1/10 | 1/10 | 1/10 | 0,5 | 0,0075 |
| Carbonato de Sodio (CaCO3) | 5 | | 1/5 | 1/10 | 1/10 | 5,4 | 0,0807 |
| Silicato de Sodio (Na2SiO3) | 10 | 5 | | 1 | 1 | 17 | 0,2541 |
| Acido Citrico (C6H8O7) | 10 | 10 | 1 | | 1 | 22 | 0,3288 |
| Hidroxido de Sodio (NaOH) | 10 | 10 | 1 | 1 | | 22 | 0,3288 |
| | | | | | Total | 66,9 | |

Los aditivos hidróxido sodio y ácido cítrico tienen ventajas respecto a disponibilidad y costos. Comercialmente se encuentran en cantidades de hasta 1 Kg, mientras que los demás aditivos mostrados en la anterior tabla se encuentran en cantidades superiores (toneladas).

Tabla 11. Matriz de selección final

| Tipo aditivo | Costo | Disponibilidad | Puntaje Final |
|--|--------|----------------|---------------|
| Lignosulfonato de Sodio (C20H24Na2O10S2) | 0,0004 | 0,0072 | 0,0076 |
| Carbonato de Sodio (CaCO3) | 0,0048 | 0,0775 | 0,0823 |
| Silicato de Sodio (Na2SiO3) | 0,0042 | 0,2439 | 0,2481 |
| Acido Citrico (C6H8O7) | 0,0107 | 0,3157 | 0,3264 |
| Hidroxido de Sodio (NaOH) | 0,0199 | 0,3157 | 0,3356 |

La matriz final indica que los aditivos a seleccionar son hidróxido de sodio y ácido cítrico.

Cuadro 4. Propiedades relevantes del ácido cítrico en suspensiones carbón-agua

| Aditivo | Propiedades |
|----------------------|---|
| Ácido cítrico | <ul style="list-style-type: none"> • Es económico y se encuentra disponible en grado reactivo (ver anexo C). • Considerado como un ácido débil, aun así existe disociación en agua elevada. • Es un ácido orgánico perteneciente a los ácidos carboxílicos, por tanto cuando se expone a temperaturas elevadas se descompone produciendo dióxido de carbón y agua lo que es una ventaja clara en las suspensiones que presenta temperaturas de combustión elevadas, por la simple razón de que disminuye las emisiones de sustancias tóxicas al ambiente. • Excelente estabilizante y dispersante lo que origina mayor duración del combustible¹⁷. |

Cuadro 5. Propiedades relevantes de hidróxido de sodio en suspensiones carbón-agua (CWS)

| Aditivo | Propiedades |
|---------------------------|--|
| Hidróxido de sodio | <ul style="list-style-type: none"> • Económico y se encuentra disponible en grado reactivo (ver anexo C). • Se disocia completamente en agua al ser una base fuerte (compuesto iónico), liberando gran cantidad de calor. • Es altamente corrosivo por lo que es recomendable determinar el pH de las suspensiones para evitar valores indeseados que pueden tener un efecto negativo sobre la viscosidad aparente, esto se hace con el fin de establecer la concentración máxima permitida. • Absorbe fácilmente la humedad del ambiente y es por eso que durante el almacenamiento debe evitarse el contacto con el ambiente. • Es un buen dispersante y humectante. Evitan la floculación mediante efectos electrostáticos y estéricos¹⁸. |

¹⁷ Primo Yúfera, Eduardo. Ácidos Carboxílicos. En: Química Orgánica Básica y Aplicada: De La Molécula a La Industria. España: REVERTÉ, 1995. 543-560 p.

¹⁸ Hopp, Vollrath. Principios Fundamentales De Química. En: Fundamentos De Tecnología Química. España: Reverté, 2005. 54-60 p.

2.2 EQUIPOS

Cuadro 6. Listado de equipos

| EQUIPO | DESCRIPCION | FOTO |
|----------------------------|---|--|
| Trituradora de mandíbula | Posee una capacidad de producción entre 35 y 110 ton/h además de un motor de 50 HP. |  |
| Molino de cuchillas alemán | Posee una capacidad de hasta un 1Kg de muestra. Produce tamaños de partícula hasta de 45 de micras. |  |
| Tamiz Estándar N° 230 | Tamiz con malla de 63 micras hecha de acero al carbón. |  |

Cuadro 6. (Continuación)

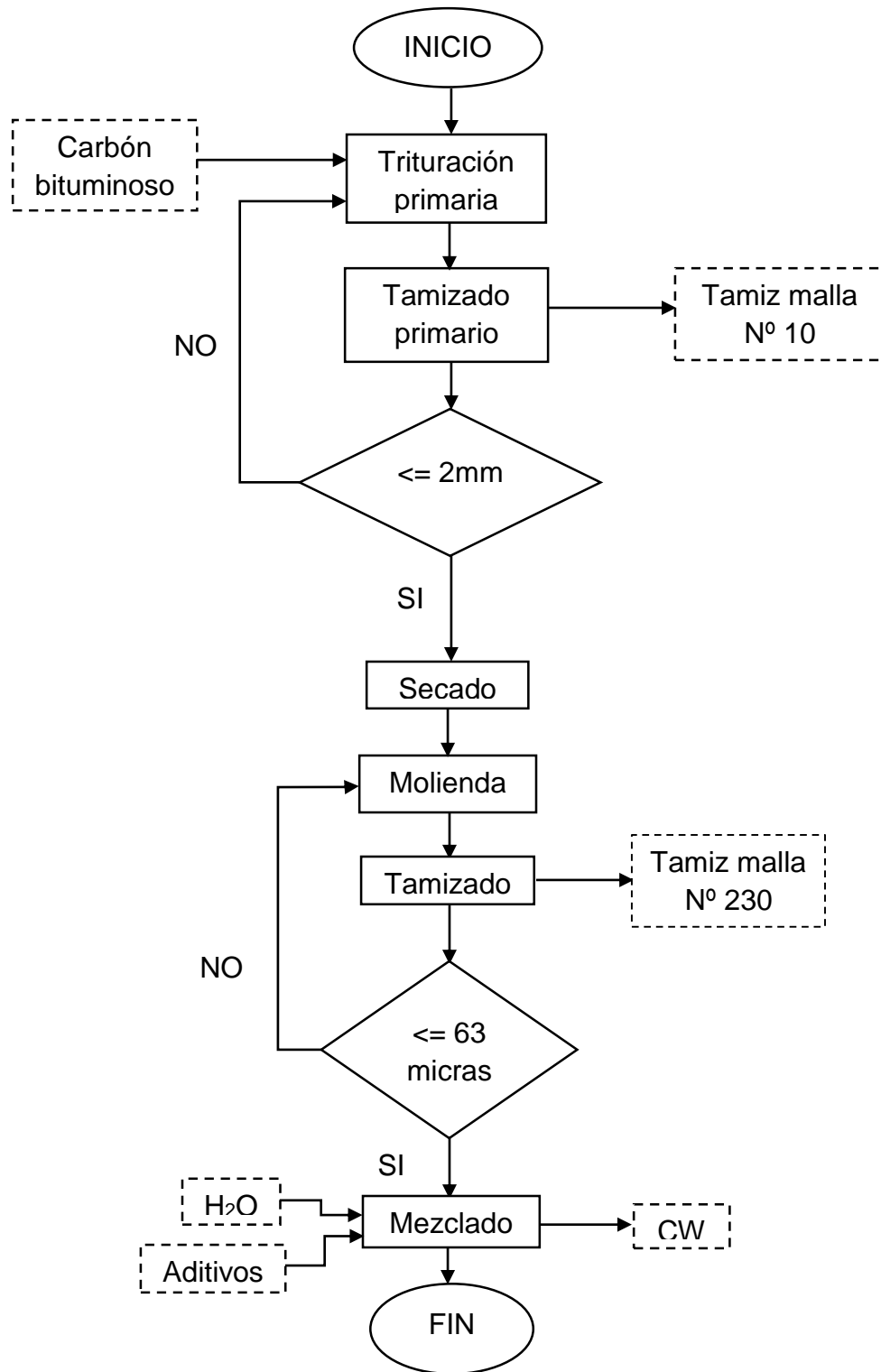
| EQUIPO | DESCRIPCION | FOTO |
|---|--|---|
| <p>Balanza analítica de alta precisión</p> | <p>Posee una capacidad hasta de 500 g y cuatro dígitos de precisión</p> |  |
| <p>pH metro de bolsillo digital</p> | <p>pH metro impermeable con la capacidad de leer pH y temperatura simultáneamente. Con rango de pH de -2 a 16 y rango de temperatura de -5 a 60°C.</p> |  |
| <p>Viscosímetro Brookfield modelo DV-II</p> | <p>Posee cinco agujas de rotación para diferentes rangos de viscosidad. El rango total de viscosidad va desde 1 hasta 6 millones de cP. Además posee dos escalas de velocidad en RPM donde el máximo valor es 100 RPM.</p> |  |

Cuadro 6. (Continuación)

| EQUIPO | DESCRIPCION | FOTO |
|---|--|---|
| <p>Balanza analítica para grandes masas</p> | <p>Alcanza hasta una capacidad de 3 kg con un dígito de precisión</p> |  |
| <p>Medidor automático de punto de nube y punto de fluidez</p> | <p>Posee sistemas de 1 y 2 etapas. El de 1 etapa va hasta temperaturas de -40°C y el de 2 etapas hasta -80°C. Genera intervalos de enfriamiento de 3°C y una inclinación de muestra de 90 grados.</p> |  |
| <p>Bomba Calorimétrica</p> | <p>Tiene una capacidad hasta de 40000 J de calor.</p> |  |

2.3 RUTA DE PROCESO CWS

Figura 2. Diagrama de proceso para la preparación de CWS



2.3.1 Proceso de trituración y molienda. El carbón en boca de mina es llevado a un molino de mandíbulas (trituración primaria) donde se obtiene un tamaño de partícula heterogéneo, posteriormente determinada cantidad de muestra (aproximadamente 100 g) es sometida a un proceso de tamizado hasta obtener un tamaño de partícula igual o inferior a 2 mm en un tamiz de malla N^o 10. Este proceso se realiza por que el molino de cuchillas empleado requiere un tamaño de partícula de 2 mm para el correcto funcionamiento.

Realizada la trituración primaria las muestras de carbón se someten a un proceso de secado en mufla por dos horas a una temperatura de 90°C, con el fin de retirar la mayor cantidad de humedad libre posible y permitir una mejor eficiencia en el tamizado.

Muestras de 1 kg son llevadas a un molino de cuchillas alemán con un tamiz adaptado (malla N^o 230), donde por media hora se lleva a cabo el proceso de molienda hasta obtener un tamaño de partícula igual o inferior a 63µm.

2.3.2 Análisis granulométrico. Las pruebas de tamizado cuando se usa una malla N^o 230 (63µm) indica que el tamaño de partícula final es heterogéneo, pero siempre igual o inferior al especificado. Este proceso puede llevarse a cabo en base seca o húmeda; recomendándose en base seca para evitar un nuevo secado de la muestra.

2.3.3 Obtención de CWS. Una vez obtenido el tamaño de partícula deseado a través de los procesos de disminución de tamaño de partícula se tiene como etapa final de preparación una mezcla del carbón pulverizado, agua y los aditivos seleccionados, esta mezcla se realiza, a través, de una agitación de 20 minutos.

Las especificaciones de la formulación de la etapa de mezclado se registran en la sección de diseño de experimentos (2.5.1 Factores y Niveles).

2.4 CARACTERIZACIÓN DEL COMBUSTIBLE

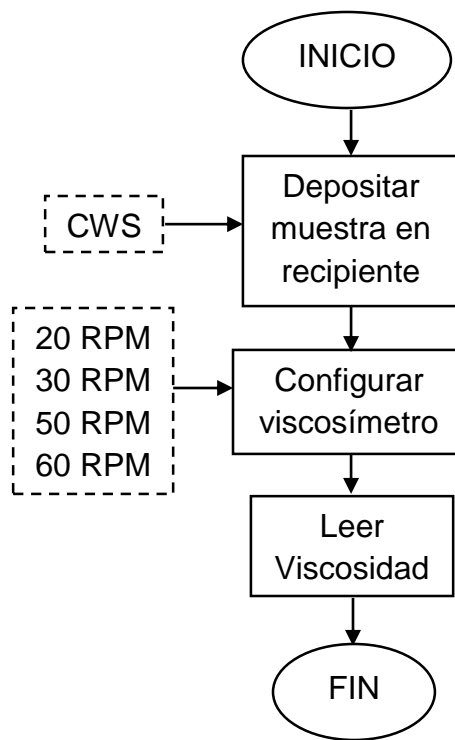
Una vez obtenido el CWS se realizan una serie de pruebas para establecer las propiedades de este y a si mismo su calidad. Esta información es de vital utilidad al momento de su uso, transporte, almacenamiento, entre otras.

2.4.1 Prueba de Viscosidad Aparente. Al ser el CWS una sustancia no newtoniana, su viscosidad varía con la temperatura y el esfuerzo cortante siendo este tipo de viscosidad llamada viscosidad aparente. Por esta característica para la prueba se hace uso de un viscosímetro brookfield.

En un principio se recoge en un recipiente una cantidad de muestra y en esta se introduce la aguja del viscosímetro hasta la marca de dicha aguja. Luego se procede a configurar el viscosímetro a distintas revoluciones a las que gira la aguja, para así determinar su viscosidad aparente en centipoises (cP). Además de la viscosidad como datos adicionales el viscosímetro determina el porcentaje de torque y la temperatura de la muestra.

Se utiliza 20, 30, 50 y 60 RPM para esta prueba que corresponde al rango en que el equipo trabajaba apropiadamente para la viscosidad del CWS.

Figura 3. Diagrama de proceso para la prueba de viscosidad aparente



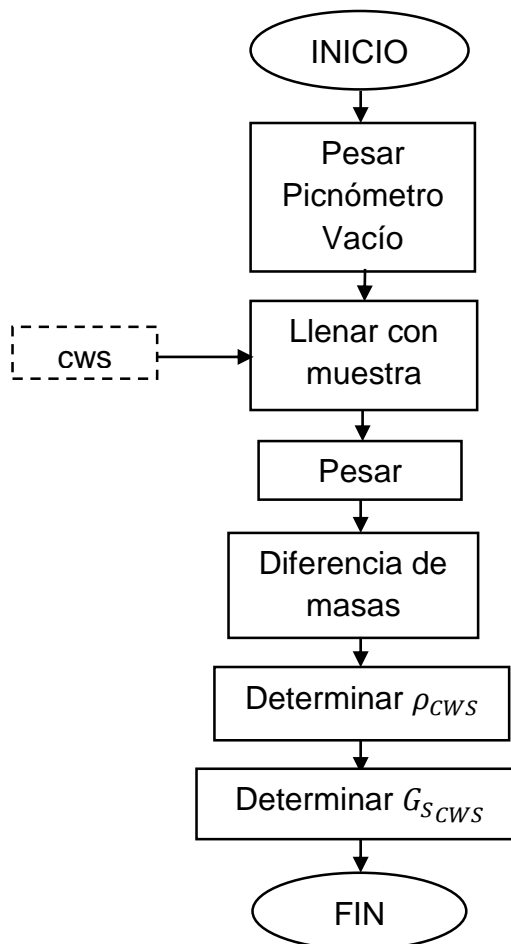
2.4.2 Prueba de Gravedad Especifica. Se requiere como primera medida determinar la densidad del CWS y luego se divide por la densidad de una sustancia patrón que será el agua siguiendo la siguiente ecuación:

Ecuación 1. Fórmula para determinar la gravedad específica del CWS

$$G_{S_{CWS}} = \frac{\rho_{CWS}}{\rho_{H_2O}}$$

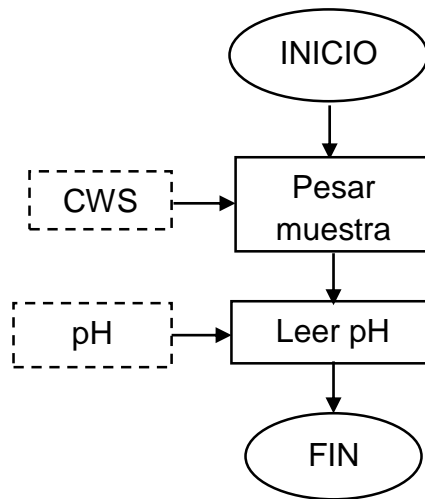
Para determinar la densidad del CWS se utiliza un picnómetro el cual se pesa vacío por medio de balanza analítica y luego se llena con una cantidad de muestra de CWS hasta llegar al aforo, para este caso será de 25ml. Una vez llenado se pesa el picnómetro. La diferencia de masas entre el picnómetro vacío y el picnómetro lleno constituye la masa del CWS. Para finalizar la masa del CWS se divide entre los 25 ml que constituyen su volumen y así se obtiene la densidad del combustible. En la figura N° 4 se puede observar el procedimiento para esta prueba.

Figura 4. Diagrama de proceso para la prueba de gravedad específica



2.4.3 Prueba de pH. Este parámetro es de vital importancia para identificar que tan corrosivo puede ser el CWS cuando este en contacto con determinados materiales. Se recomienda que el combustible este lo más cerca posible a la neutralidad. Para determinar el pH del CWS se hace uso de un pH metro.

Figura 5. Diagrama de proceso para la prueba de pH

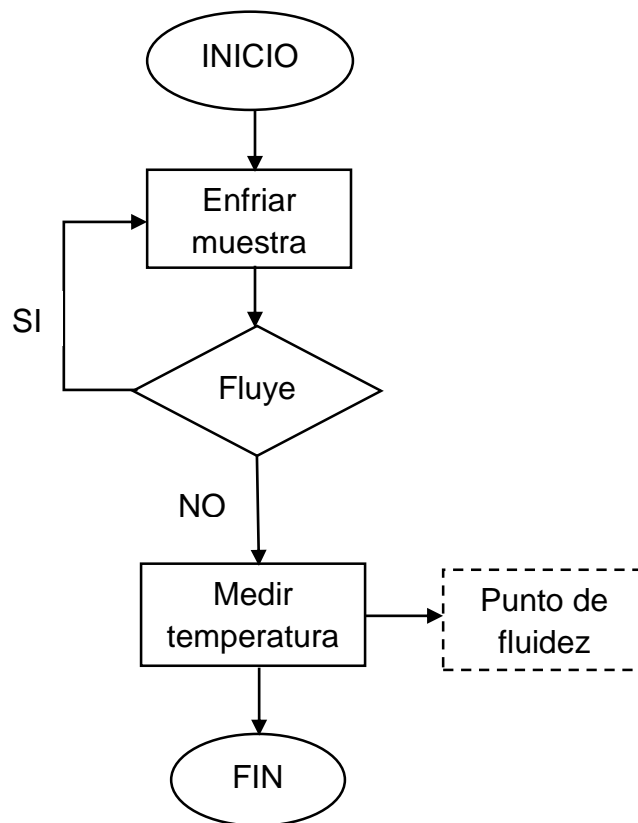


2.4.4 Prueba de Punto de Fluidez. Se evalúa la temperatura mínima a la cual el combustible puede fluir.

Una cantidad de muestra de aproximadamente 25ml se ingresa a un sistema de enfriamiento y cada cierto tiempo (intervalos de 1 minuto) se saca y se gira a 180 grados para que por gravedad fluya. Una vez la muestra ha dejado de fluir casi en su totalidad se mide la temperatura obteniendo así el punto de fluidez del combustible¹⁹.

En la figura 6 se ilustra el proceso para determinar el punto de fluidez de un combustible.

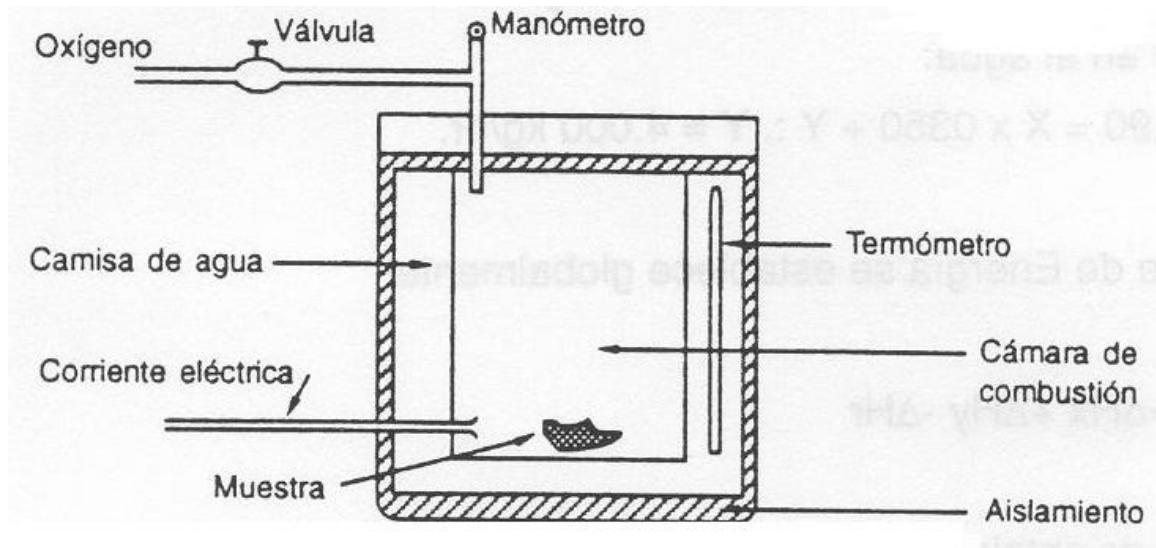
Figura 6. Diagrama de proceso de la prueba de punto de fluidez



¹⁹ ASTM INTERNATIONAL. Standard Test Method for Pour Point of Petroleum Products.16 ed. EE. UU: ASTM. 2016. 6 pág.

2.4.5 Prueba de Poder Calorífico. Esta se realiza ingresando una muestra de 1 Kg de CWS a una bomba calorimétrica en donde se oxida completamente y se calcula el calor producido en la combustión midiendo la energía obtenida por un fluido circundante del que se conozcan sus datos, en este caso el agua.

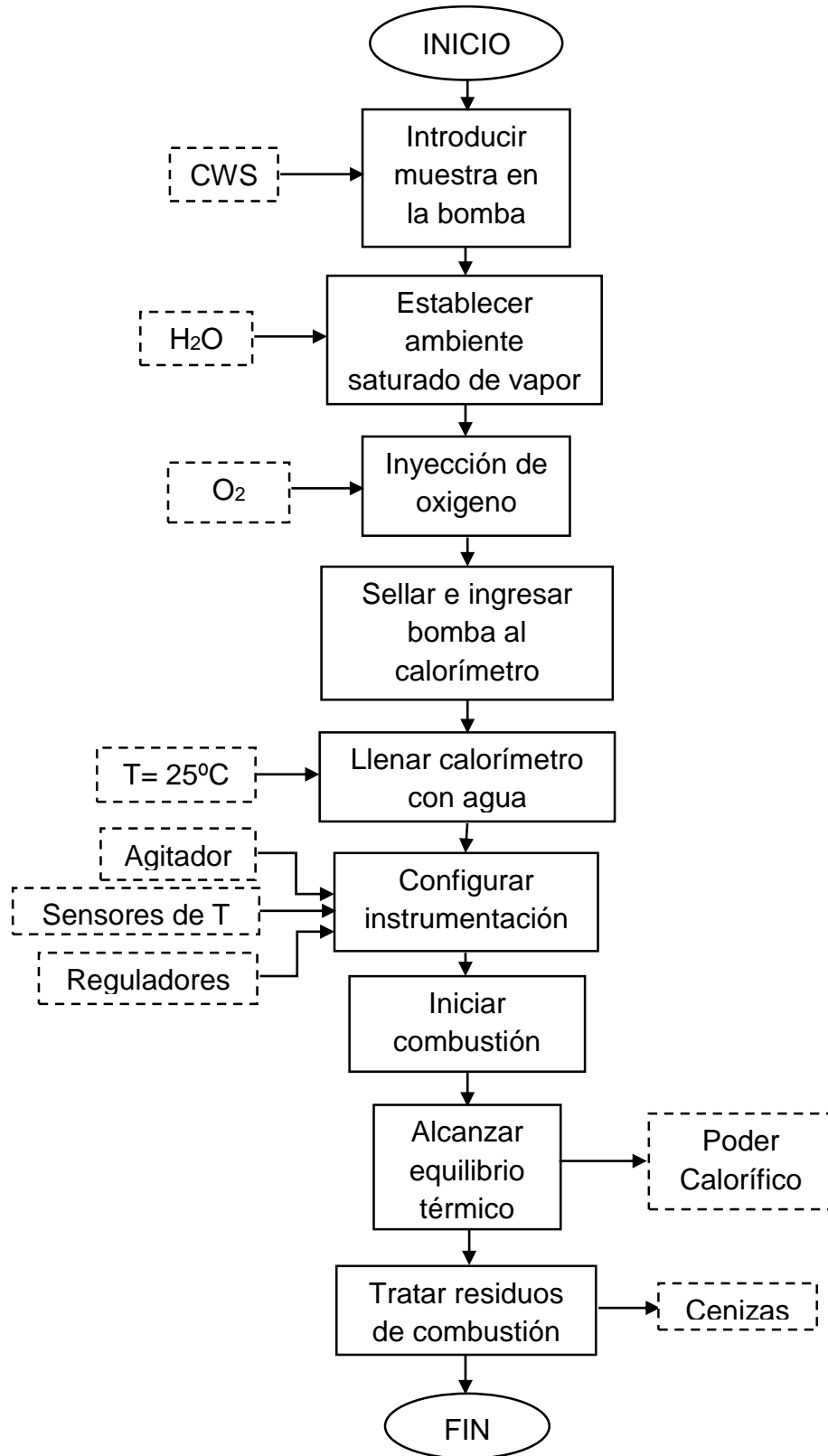
Figura 7. Esquema del interior de una bomba calorimétrica



Fuente: Calor de mezcla [citado el 25 noviembre de 2015]. Disponible en: http://datateca.unad.edu.co/contenidos/223156/MODULO_EXE/leccin_142.html.

En un principio se requiere la muestra previamente pesada dentro de la bomba en el soporte especial para esta, que está dispuesto en las proximidades del sistema de calentamiento por resistencia o electrodos de ignición. Luego se agrega agua en el fondo de la bomba para establecer un ambiente saturado de vapor que capture posibles calores de combustión indeseables como los NO_x y SO_x . Al crear el ambiente saturado se llena la bomba con oxígeno a presión para purgar el oxígeno del interior de la bomba, una vez terminado el proceso se deja de inyectar oxígeno, se cierra la bomba y se introduce en el recipiente calorimétrico, además de que se conectan los electrodos. Posteriormente el recipiente calorimétrico es llenado con agua a temperatura ambiente y se configuran las demás piezas del equipo como el sistema de agitación, los reguladores y medidores. Una vez este todo dispuesto se inicia la ignición a través de los electrodos y se mide la temperatura hasta el equilibrio térmico. Finalmente, la bomba es extraída del recipiente calorimétrico y se abre para pesar los sólidos y cenizas.

Figura 8. Diagrama de proceso para la prueba de poder calorífico



2.5 DISEÑO DE EXPERIMENTOS

En diversos experimentos intervienen modelos estadísticos que tienen como objetivo determinar si dos o más factores afectan una variable de salida (variable de interés). Estos se encuentran ligados con la experimentación donde una réplica o más, de determinado experimento mostrarán cierta variabilidad dependiendo de la dificultad para controlar las variables. La idea principal es comparar las respuestas en diferentes niveles de variables controladas y a partir del análisis de resultados encontrar las posibles causas que originaron variación en la respuesta. En los ensayos preliminares se utiliza un diseño factorial con tres factores y dos niveles cada uno.

2.5.1 Factores y niveles. La viscosidad o variable de salida del diseño de experimentos se selecciona de acuerdo a lo reportado en la teoría por ser la propiedad reológica más estudiada y la que representa el mayor problema en las suspensiones carbón-agua. Es importante mantener viscosidades por debajo de los 2000 Centipoise a altas velocidades de cizalla (desde 100s^{-1}) para que el combustible pueda ser fácilmente bombeado y atomizado; lo que permite a la vez mantener baja velocidad de sedimentación ($<2\text{mm/h}$) mejorando el almacenamiento y transporte de las suspensiones²⁰.

Las variables que influyen en la viscosidad aparente de una suspensión carbón-agua se describen a continuación:

- Tipo de carbón: Un gran número de variables relativas (cantidad de volátiles, humedad y cenizas) a las características del carbón influyen directamente sobre la viscosidad y de ello dependerá si se obtienen lodos altamente viscosos o no. Altos valores de la relación oxígeno/ carbón y humedad no son favorables para obtener buenas suspensiones; otro factor que puede afectar es la densidad.
- Concentración de carbón: La viscosidad aparente aumenta a medida que la concentración de carbón aumenta; las cantidades de carbón deben estar entre un 50-70% en suspensión. Por debajo de este rango el poder calorífico caerá de manera drástica y por encima de un 70% la viscosidad se convierte en una variable difícil de controlar²¹.

²⁰ Lee, Sunggyu y H, Kimberly. Coal-Water Slurries. En: Particle Technology and Applications. Estados Unidos: 2012. 111-122 p.

²¹ Variali, B. CWS State of the Art. En: Coal-Water Slurry Contribution to the European Economic Community's Energy. University of Rome: 1989. 1-10 p.

- Tipo de aditivo. El tipo de aditivo a utilizar actúa como dispersante mediante efectos de repulsión, varía en función del tipo y concentración de carbón, este afecta las propiedades reológicas de las suspensiones disminuyendo la viscosidad y a su vez puede causar un efecto positivo o negativo en la velocidad de sedimentación (estabilidad).
- Concentración de aditivo. Es una variable importante en la viscosidad final del combustible. A mayor concentración de aditivo menor es la viscosidad obtenida; siempre se debe buscar la concentración óptima en suspensión, es decir a una concentración baja de aditivo el poder de dispersión tiende a ser bajo y a concentraciones muy altas se incurre en gastos innecesarios. La literatura reporta que las cantidades óptimas deben rondar el 1% de aditivo²².
- Tamaño de partícula. Cuando el carbón mineral es pulverizado aumenta el área superficial y disminuye el tamaño de partícula; esto es, a menor tamaño de partícula menor la viscosidad obtenida, hasta cierto punto debido a que a diámetros muy pequeños ocurre el efecto contrario, esto se justifica teniendo en cuenta que el área superficial aumenta tanto que se requerirá volúmenes de agua más grandes para poder humectar las partículas.
- Temperatura. La temperatura es un factor que afecta fuertemente la viscosidad, en la mayoría de estudios se ha reportado que la viscosidad disminuye con el aumento de temperatura. La viscosidad se relaciona con la facilidad con la que las moléculas pueden moverse respecto a otras (fuerza de cohesión), y con la energía cinética (movimiento). A temperaturas bajas prevalece la fuerza de cohesión por que las moléculas están muy juntas y a temperaturas elevadas aumenta el efecto de la energía cinética por tanto la viscosidad disminuye. Un ejemplo de ello lo representan las suspensiones carbón-agua²³.

²² Dincer, H., et al. The effect of chemicals on the viscosity and stability of coal water slurries. En: INTERNATIONAL JOURNAL OF MINERAL PROCESSING. 2003.vol. 70, no. 1, p. 41-51.

²³ Das, Debadutta, et al. Improving stability of concentrated coal–water slurry using mixture of a natural and synthetic surfactants. En: FUEL PROCESSING TECHNOLOGY. 2013.vol. 113, p. 41-51.

De acuerdo a lo anterior las variables y valores de niveles a escoger son los siguientes:

Concentración de carbón, se selecciona un tipo de carbón bituminoso por dar los mejores resultados según lo reportado en numerosos artículos. Las concentraciones de carbón a usar son 50 y 55%²⁴.

Tipo y concentración de aditivo, de acuerdo a las matrices de selección expuestas con anterioridad (sección 2.1.2) se evidencio las ventajas de utilizar como dispersante hidróxido de sodio y ácido cítrico (costo y disponibilidad). Estos aditivos se aplican en concentraciones de 0,8 y 1%.

El tipo de carbón (carbón bituminoso) se deja constante, donde se concluye por un lado que un carbón tipo antracita debido a su bajo contenido de volátiles que esta entre el 2 al 8%, no arde tan fácilmente lo que incurrirá en pérdidas de energía adicionales (precalentamiento), mientras que un carbón lignito posee bajo poder calorífico (<8300 BTU/lb). Un carbón bituminoso presenta alto contenido de volátiles mayor a 31% mejorando el proceso de combustión. El tamaño de partícula del carbón pulverizado se toma de 63 μm (malla N^o 230) puesto que se encuentra por debajo del máximo tamaño permitido para suspensiones (74 μm ²⁵), a su vez trabajar con un diámetro de partícula inferior implica mayor consumo energético y equipos especiales y esto expone las razones por las cuales el diámetro de partícula se toma constante.

Las medidas de viscosidad en viscosímetro Brookfield se toman a temperatura ambiente aproximadamente 22 °C.

Tabla 12. Intervalo de valores de variables a analizar

| Concentración de carbón % | Tipo de aditivo | Concentración de aditivo % |
|---------------------------|--------------------|----------------------------|
| 50 | Hidróxido de sodio | 0,8 |
| 55 | Ácido cítrico | 1 |

A partir de la anterior tabla se realiza la formulación de la suspensión, en base a la cantidad mínima que requerirá el viscosímetro brookfield (250 ml).

²⁴ Ishra, SK; Senapati, PK y Panda, D. Rheological behavior of coal-water slurry. En: ENERGY SOURCES. 2002.vol. 24, no. 2, p. 159-167.

²⁵ LASKOWSKI, Janusz S. Chapter 10 Fine-Coal Utilization. En: Coal Flotation and Fine Coal Utilization. Vancouver, Canadá: 2001. 307-351 p. ISBN 0167-4528.

Tabla 13. Cantidad de materias primas para formulación de CWS

| Cantidad de carbón (g) | Tipo de aditivo | Cantidad de aditivo (g) |
|------------------------|--------------------|-------------------------|
| 170 | Hidróxido de sodio | 2,72 |
| 187 | Ácido cítrico | 3,4 |

- Las cantidades restantes son de agua hasta completar 340 g de suspensión, que equivale aproximadamente a 250 ml de CWS, debido a que la densidad del carbón es mayor a la del agua.

De acuerdo a los valores de los niveles reportados en la tabla 18 se observa que la concentración de carbón y aditivo son variables cuantitativas mientras que el tipo de aditivo es una variable cualitativa, para efectos de facilidad de cálculos en el desarrollo del diseño de experimentos se asignan los siguientes valores:

Hidróxido de sodio=1. Ácido cítrico=2

Tabla 14. Corridas de operación para cada ensayo de viscosidad aparente.

| Orden Corrida | Tipo de aditivo | Concentración de aditivo | Concentración de carbón |
|---------------|-----------------|--------------------------|-------------------------|
| 1 | 1 | 0,8 | 50 |
| 2 | 2 | 0,8 | 50 |
| 3 | 1 | 1 | 50 |
| 4 | 2 | 1 | 50 |
| 5 | 1 | 0,8 | 55 |
| 6 | 2 | 0,8 | 55 |
| 7 | 1 | 1 | 55 |
| 8 | 2 | 1 | 55 |
| 9 | 1 | 0,8 | 50 |
| 10 | 2 | 0,8 | 50 |
| 11 | 1 | 1 | 50 |
| 12 | 2 | 1 | 50 |
| 13 | 1 | 0,8 | 55 |
| 14 | 2 | 0,8 | 55 |
| 15 | 1 | 1 | 55 |
| 16 | 2 | 1 | 55 |

2.5.2 Modelo Factorial 2^k . Para fin de este trabajo de grado se utiliza un diseño factorial debido a que este es útil cuando se requiere conocer el efecto de los diferentes factores que intervienen en el proceso de experimentación así como todas las posibles combinaciones entre los niveles de los factores tanto para las muestras originales como a sus réplicas²⁶.

Así con este tipo de diseño se conoce que tanto es el cambio en la variable respuesta según el cambio de nivel de cada factor presente.

En el diseño factorial 2^k más específicamente 2^3 se tienen en cuenta 3 factores cada uno con dos niveles que fueron expuestos anteriormente.

El diseño factorial 2^3 posee un sistema de notación que representan las distintas combinaciones de factores que pueden existir:

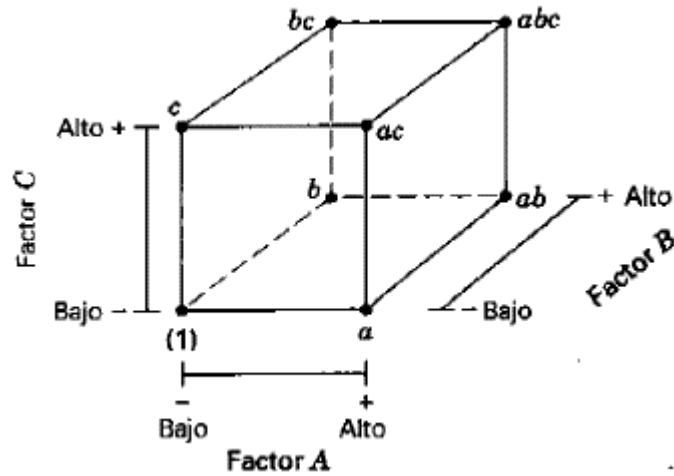
Figura 9. Notación para las diferentes corridas del diseño 2^3

| Corrida | <i>A</i> | <i>B</i> | <i>C</i> | Etiquetas | <i>A</i> | <i>B</i> | <i>C</i> |
|---------|----------|----------|----------|------------|----------|----------|----------|
| 1 | - | - | - | (1) | 0 | 0 | 0 |
| 2 | + | - | - | <i>a</i> | 1 | 0 | 0 |
| 3 | - | + | - | <i>b</i> | 0 | 1 | 0 |
| 4 | + | + | - | <i>ab</i> | 1 | 1 | 0 |
| 5 | - | - | + | <i>c</i> | 0 | 0 | 1 |
| 6 | + | - | + | <i>ac</i> | 1 | 0 | 1 |
| 7 | - | + | + | <i>bc</i> | 0 | 1 | 1 |
| 8 | + | + | + | <i>abc</i> | 1 | 1 | 1 |

Fuente: Montgomery, Douglas C. Diseño y Análisis de Experimentos. Capítulo 5. 686 p.

²⁶ Montgomery, Douglas C. Diseño y Análisis De Experimentos. México: Limusa. 2 ed. México: LIMUSA WILEY, 2002. 686 p. ISBN 968-18-6156-6.

Figura 10. Representación gráfica del diseño factorial 2³



Fuente: Montgomery, Douglas C. Diseño y Análisis de Experimentos. Capítulo 5. 686 p.

Como se estableció en un principio los diseños factoriales se caracterizan por los efectos de cada factor y combinaciones entre estos. A continuación, está presente la ecuación para dichos efectos:

Ecuación 2. Ejemplo para determinar el efecto de los factores

$$Efecto A = \frac{1}{4n} [a + ab + ac + abc - (1) - b - c - bc]$$

Donde:

n= N° de replicas

a, ab, ac, abc, (1), b, c, bc= Son los factores o las combinaciones

De manera análoga se expresa para los demás factores y combinaciones de estos.

La muestra de cálculo de los efectos se encuentra en el ANEXO E.

3. DESARROLLO EXPERIMENTAL

3.1 RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE CARACTERIZACIÓN

Todas las pruebas con excepción de la viscosidad aparente se realizan en solo 3 muestras de CWS como consecuencia de las altas cantidades de muestras requeridas para determinar el poder calorífico. Las 3 muestras a analizar son aquellas que presentan las viscosidades más bajas.

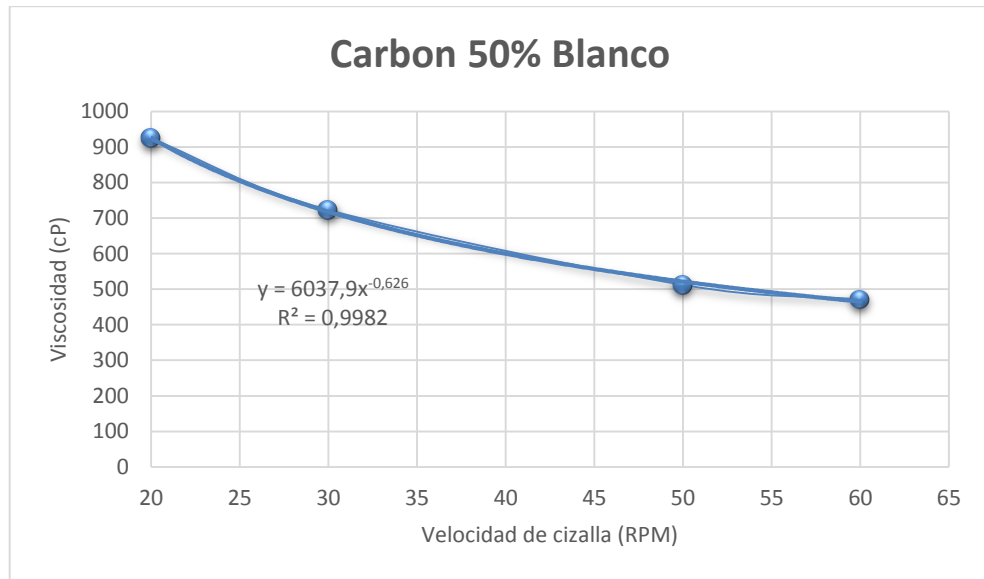
La viscosidad aparente se determina a 16 muestras que son las exigidas para un diseño factorial 2^3 con un replica y a dos blancos necesarios para realizar comparaciones de cambio de viscosidad a las condiciones establecidas en el diseño de experimentos.

3.1.1 Viscosidad Aparente. Los resultados de viscosidad aparente tomados en el viscosímetro brookfield, se realizan en primera instancia para las muestras sin ningún tipo de aditivo (blancos), posteriormente las muestras a analizar son aquellas en las que se agregan aditivos de acuerdo a las corridas establecidas en el diseño de experimentos; de igual forma el orden de resultados se muestra en el mismo de las corridas:

Tabla 15. Resultados de viscosidad de blancos

| Velocidad de cizalla (RPM) | Viscosidad (mPaS) | |
|----------------------------|-------------------|-------------------|
| | Blanco 50% carbón | Blanco 55% carbón |
| 20 | 924 | 1500 |
| 30 | 723 | 1020 |
| 50 | 512 | 800 |
| 60 | 471 | 556 |

Gráfica 1. Cambios de viscosidad respecto a la velocidad de cizalla para el blanco de 50%.



Gráfica 2. Cambios de viscosidad respecto a la velocidad de cizalla para el blanco de 55%.

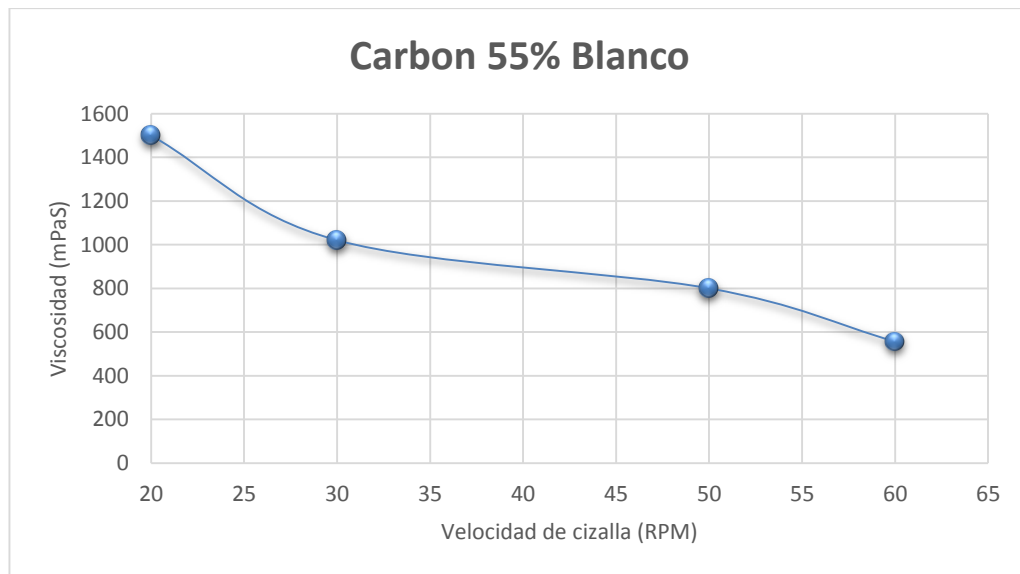


Tabla 16. Resultados de viscosidad de muestra y replica con 50% de carbón y 0,8% NaOH.

| Velocidad de cizalla (RPM) | Viscosidad (mPaS) | |
|----------------------------|-------------------|---------|
| | Muestra | Replica |
| 20 | 660 | 678 |
| 30 | 492 | 536 |
| 50 | 297,6 | 336 |
| 60 | 210 | 263 |

Gráfica 3. Cambios de viscosidad respecto a la velocidad de cizalla con 50% de carbón y 0,8% NaOH.

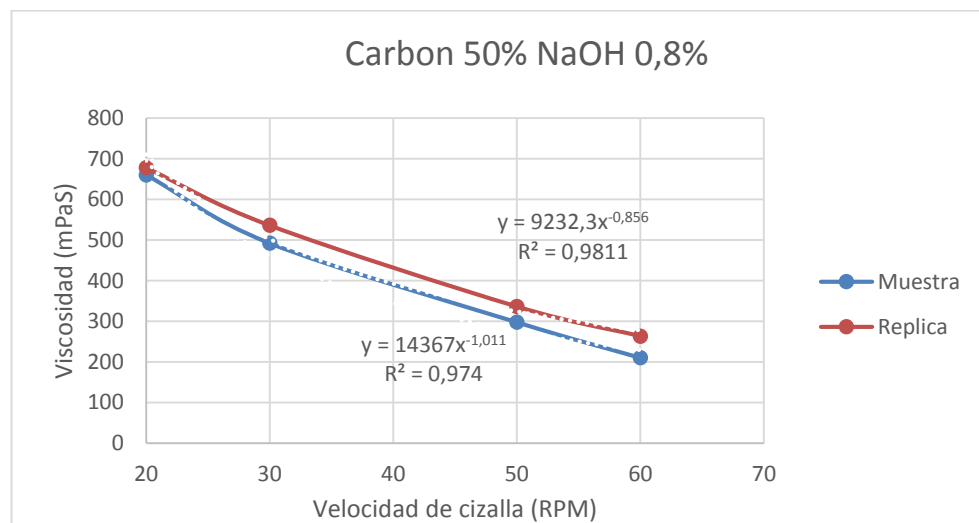


Tabla 17. Resultados de viscosidad de muestra y replica con 50% de carbón y 0,8% de ácido cítrico.

| Velocidad de cizalla (RPM) | Viscosidad (mPaS) | |
|----------------------------|-------------------|---------|
| | Muestra | Replica |
| 20 | 425 | 480 |
| 30 | 390 | 428 |
| 50 | 364 | 380 |
| 60 | 350 | 364 |

Gráfica 4. Cambios de viscosidad respecto a la velocidad de cizalla con 50% de Carbón y 0,8% Ácido Cítrico.

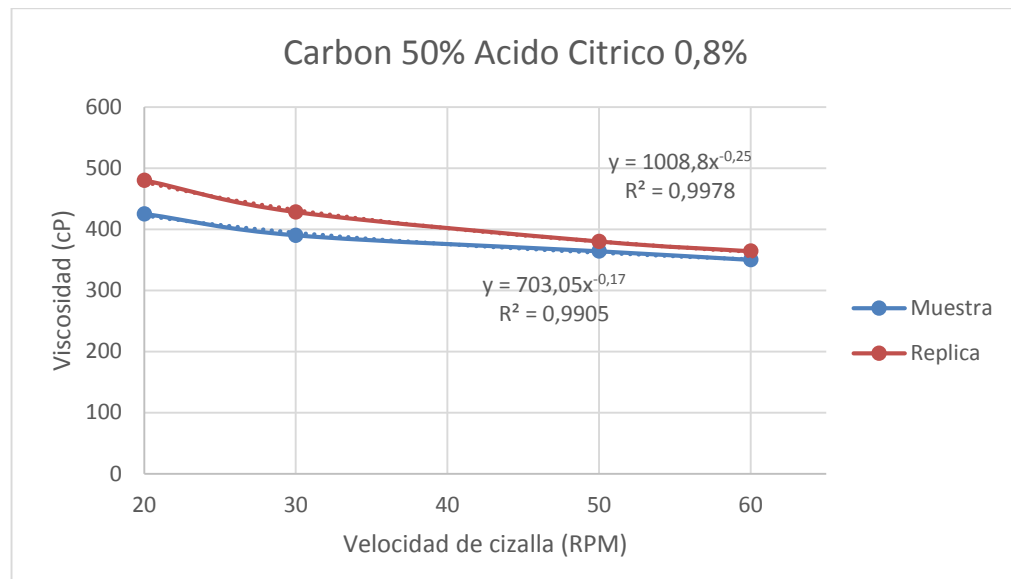


Tabla 18. Resultados de viscosidad de muestra y replica con 50% de carbón y 1% NaOH.

| Velocidad de cizalla (RPM) | Viscosidad (mPaS) | |
|----------------------------|-------------------|---------|
| | Muestra | Replica |
| 20 | 842,1 | 880 |
| 30 | 696 | 723 |
| 50 | 460,8 | 537,2 |
| 60 | 417 | 452 |

Gráfica 5. Cambios de viscosidad respecto a la velocidad de cizalla con 50% de Carbón y 1% NaOH.

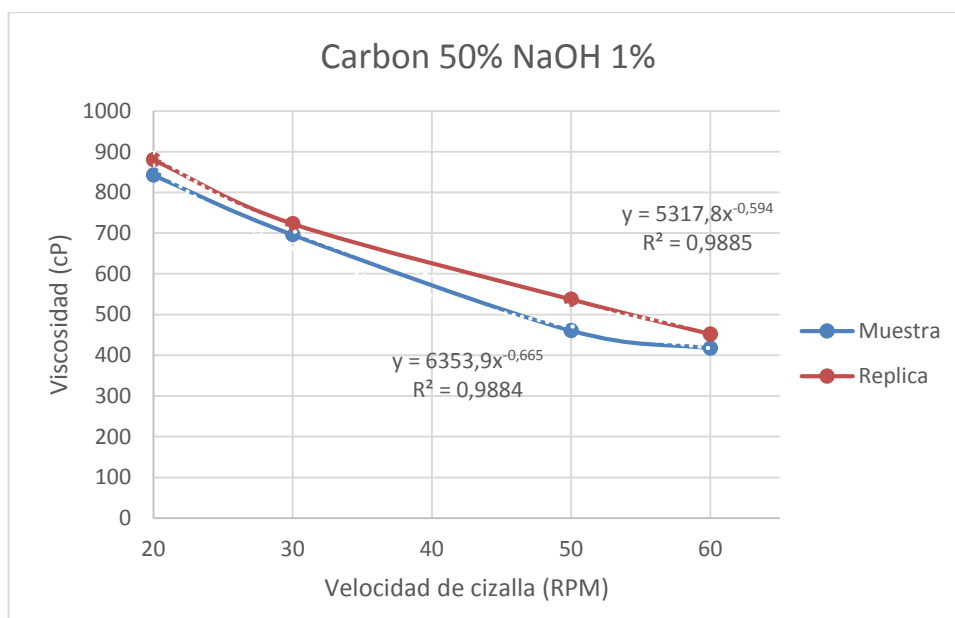


Tabla 19. Resultados de viscosidad de muestra y replica con 50% de carbón y 1% de ácido cítrico.

| Velocidad de cizalla (RPM) | Viscosidad (mPaS) | |
|----------------------------|-------------------|---------|
| | Muestra | Replica |
| 20 | 451 | 484 |
| 30 | 380 | 402 |
| 50 | 300,3 | 340 |
| 60 | 231 | 268 |

Gráfica 6. Cambios de viscosidad respecto a la velocidad de cizalla con 50% Carbón y 1% Ácido Cítrico.

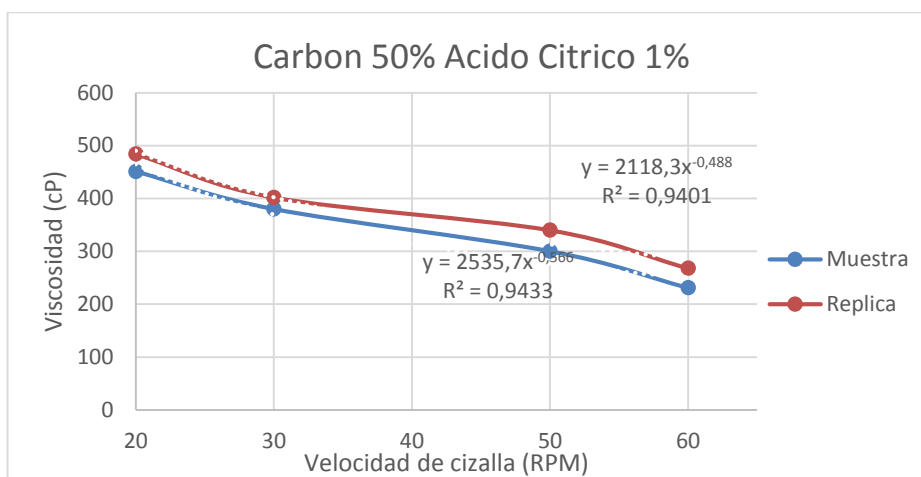


Tabla 20. Resultados de viscosidad de muestra y replica con 55% de carbón y 0,8% NaOH.

| Velocidad de cizalla (RPM) | Viscosidad (mPaS) | |
|----------------------------|-------------------|---------|
| | Muestra | Replica |
| 20 | 485 | 532 |
| 30 | 410 | 450 |
| 50 | 301 | 350,6 |
| 60 | 192 | 230,5 |

Gráfica 7. Cambios de viscosidad respecto a la velocidad de cizalla con 55% de Carbón y 0,8% NaOH.

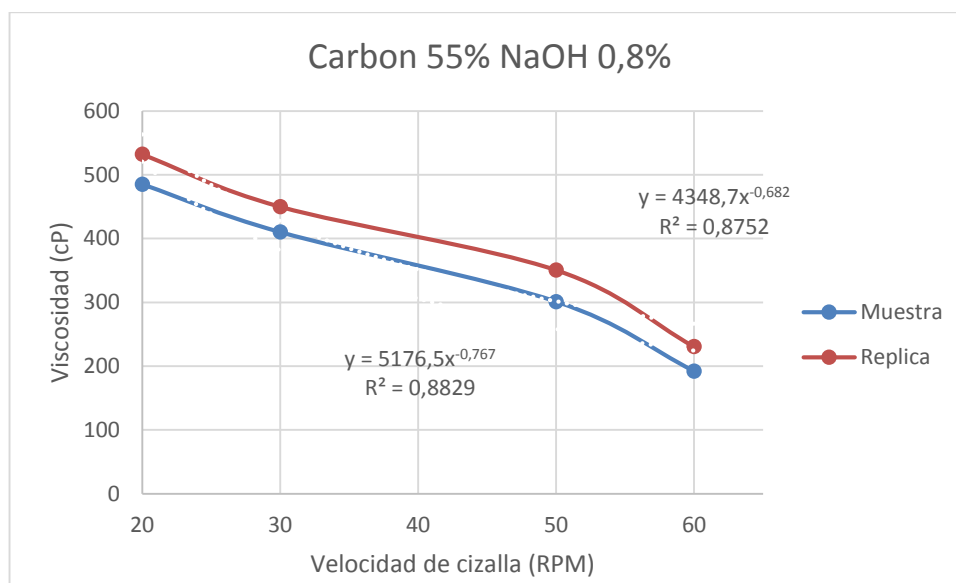


Tabla 21. Resultados de viscosidad de muestra y replica con 55% de carbón y 0,8% de ácido cítrico.

| Velocidad de cizalla (RPM) | Viscosidad (mPaS) | |
|----------------------------|-------------------|---------|
| | Muestra | Replica |
| 20 | 460 | 470 |
| 30 | 354 | 382 |
| 50 | 259,2 | 300,3 |
| 60 | 230 | 270 |

Gráfica 8. Cambios de viscosidad respecto a la velocidad de cizalla con 55% de carbón y 0,8% ácido cítrico.

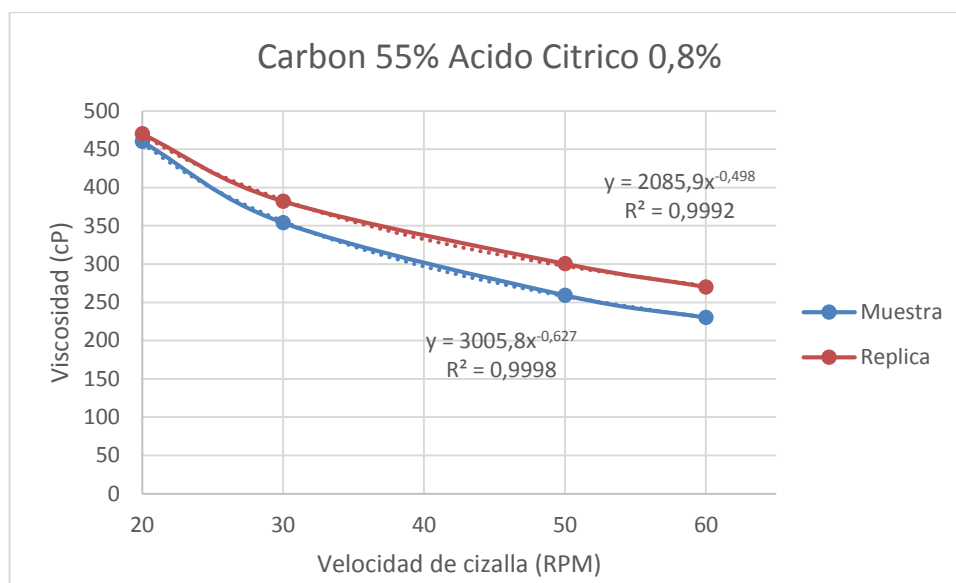


Tabla 22. Resultados de viscosidad muestra y replica con 55% de Carbón y 1% NaOH.

| Velocidad de cizalla (RPM) | Viscosidad (mPaS) | |
|----------------------------|-------------------|---------|
| | Muestra | Replica |
| 20 | 648 | 690 |
| 30 | 561 | 623 |
| 50 | 320 | 355 |
| 60 | 278 | 300 |

Gráfica 9. Cambios de viscosidad respecto a la velocidad de cizalla con 55% de Carbón y 1% de NaOH

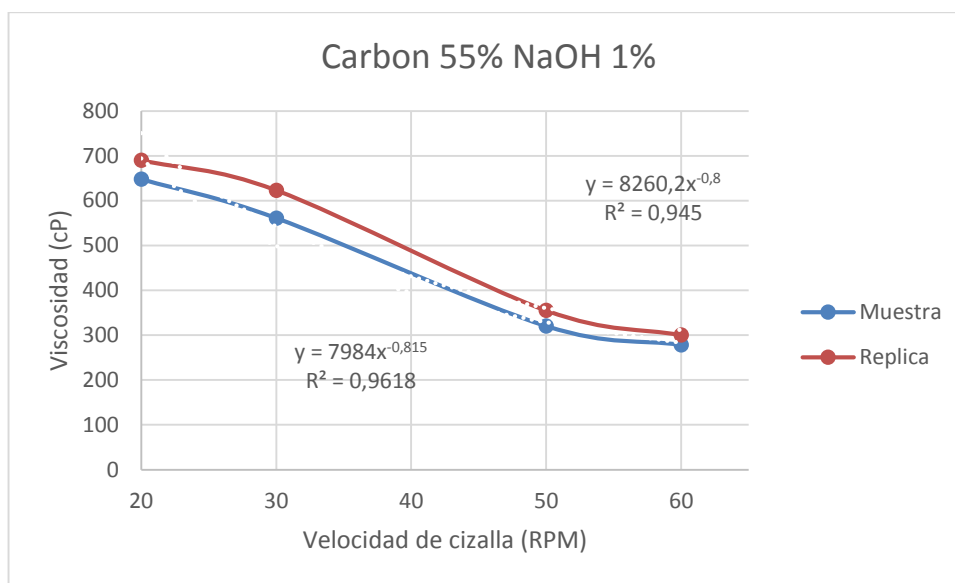
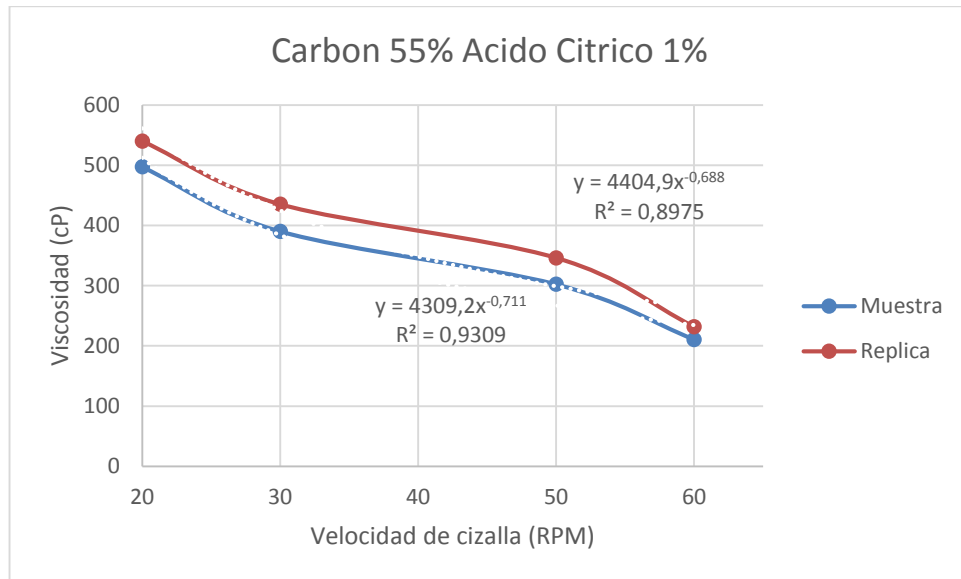


Tabla 23. Resultados de viscosidad muestra y replica con 55% de Carbón y 1% Ácido Cítrico

| Velocidad de cizalla (RPM) | Viscosidad (mPaS) | |
|----------------------------|-------------------|---------|
| | Muestra | Replica |
| 20 | 497 | 540 |
| 30 | 390 | 435,1 |
| 50 | 302 | 346 |
| 60 | 210,5 | 231,6 |

Gráfica 10. Cambios de viscosidad respecto a la velocidad de cizalla con 55% de Carbón y 1% Ácido Cítrico.



A partir de los anteriores resultados se seleccionan las muestras con menor viscosidad, a las que se les efectúa las demás pruebas de caracterización obteniéndose las siguientes formulaciones y viscosidades respectivamente:

- Muestra con 55% de carbón 45% de agua y +0,8% de NaOH: 325,63 mPaS
- Muestra con 50% de carbón 50% de agua y +1% de ácido cítrico: 327,46 mPaS
- Muestra con 55% de carbón 45% de agua y +0,8% de ácido cítrico: 311,92 mPaS

Los resultados para estas muestras se registran en la sección 3.2, donde se emplea el teorema del punto medio para determinar las viscosidades más bajas.

3.1.2 Gravedad específica. Para determinar esta propiedad con picnómetro se requieren los datos iniciales de volumen y masa de la muestra para obtener la densidad:

Tabla 24. Resultados de densidad con picnómetro para muestras de CWS.

| Muestra | Picnómetro Vacío (g) | Picnómetro Lleno (g) | Masa muestra (g) | Volumen muestra (ml) | Densidad (g/ml) |
|---------------------|----------------------|----------------------|------------------|----------------------|-----------------|
| 55% NaOH 0,8% | 17,44 | 47,99 | 30,54 | 25 | 1,22 |
| 50% A. Cítrico 1% | 17,43 | 47,15 | 29,71 | 25 | 1,18 |
| 55% A. Cítrico 0,8% | 28,07 | 88,43 | 60,36 | 50 | 1,20 |

Como la densidad del agua en g/ml es de 1 la gravedad específica es igual a la densidad de la muestra:

Tabla 25. Gravedad específica de las muestras de CWS.

| Muestra | Gravedad Específica |
|---------------------|---------------------|
| 55% NaOH 0,8% | 1,22 |
| 50% A. Cítrico 1% | 1,18 |
| 55% A. Cítrico 0,8% | 1,20 |

3.1.3 pH. Propiedad establecida con pH metro a las muestras de CWS obteniéndose los siguientes resultados:

Tabla 26. Distintos pH para las muestras de CWS.

| Muestra | pH |
|---------------------|------|
| 55% NaOH 0,8% | 8,4 |
| 50% A. Cítrico 1% | 7,52 |
| 55% A. Cítrico 0,8% | 7,82 |

3.1.4 Punto de fluidez. Al exponer las muestras de CWS a bajas temperaturas, así como indica la norma ASTM D-97 con el dispositivo que lleva el mismo nombre de la prueba se obtienen las siguientes temperaturas:

Tabla 27. Punto de fluidez de las muestras de CWS.

| Muestra | Punto de fluidez (°C) |
|---------------------|-----------------------|
| 55% NaOH 0,8% | -5 |
| 50% A. Cítrico 1% | -4 |
| 55% A. Cítrico 0,8% | -4 |

3.1.5 Poder calorífico. Se determina mediante bomba calorimétrica, donde el agua contenida en la suspensión es evaporada y finalmente se obtiene el poder calorífico en base seca:

Tabla 28. Poder calorífico CWS.

| Muestra | Poder calorífico (Kcal/Kg) |
|---------------------|----------------------------|
| 55% NaOH 0,8% | 6852 |
| 50% A. Cítrico 1% | 6732 |
| 55% A. Cítrico 0,8% | 6776 |

3.2 RESULTADOS DISEÑO DE EXPERIMENTOS

La viscosidad o variable respuesta del diseño de experimentos se obtiene promediando los resultados de la prueba de viscosidad tanto para la muestra original como para la réplica.

Para este promedio se utiliza el teorema del valor medio:

Ecuación 3. Teorema del punto medio

$$\frac{1}{b-a} \int_a^b f(x) dx$$

Donde:

a = Valor inferior del rango de valores

b = Valor superior del rango de valores

$f(x)$ = Función a promediar. En este caso es la regresión potencial de cada grafica de viscosidad contra velocidad de cizalla de la prueba de viscosidad.

La muestra de cálculos de la aplicación del teorema está presente en el ANEXO E.

Con estos valores promediados se completa el cuadro de corridas para el diseño de experimentos del CWS.

Tabla 29. Corridas diseño de experimentos para CWS del tipo 2³.

| CORRIDA | A | B (%) | C (%) | Combinación | Replicas (mPaS) | |
|---------|------------|-------|-------|-------------|-----------------|--------|
| | | | | | I | II |
| 1 | A. Cítrico | 0,8 | 50 | 1 | 378,94 | 406,91 |
| 2 | NaOH | 0,8 | 50 | a | 379,50 | 422,91 |
| 3 | A. Cítrico | 1 | 50 | b | 327,46 | 362,04 |
| 4 | NaOH | 1 | 50 | ab | 575,48 | 621,13 |
| 5 | A. Cítrico | 0,8 | 55 | c | 311,92 | 343,90 |
| 6 | NaOH | 0,8 | 55 | ac | 325,63 | 370,62 |
| 7 | A. Cítrico | 1 | 55 | bc | 331,09 | 367,44 |
| 8 | NaOH | 1 | 55 | abc | 423,23 | 461,91 |

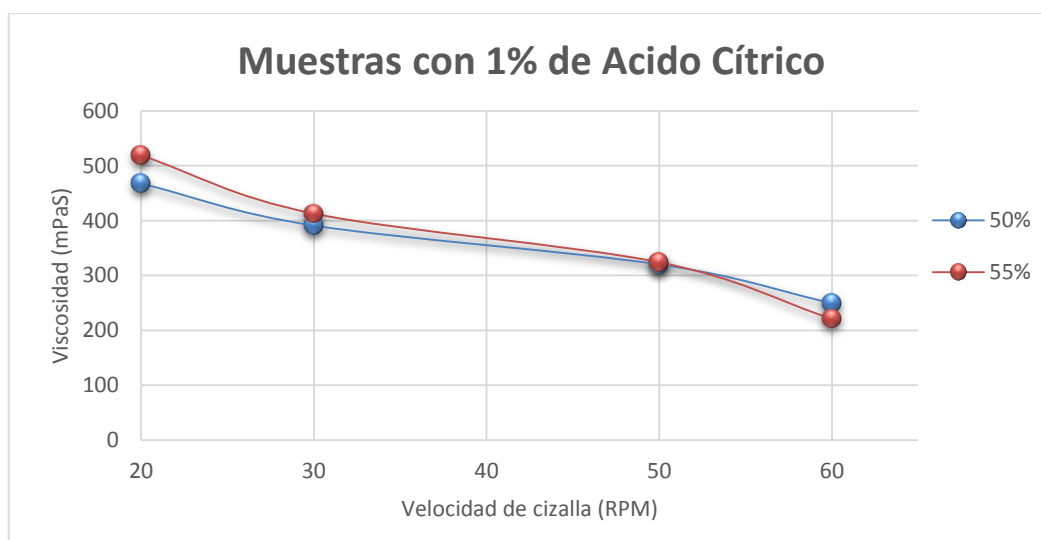
Para esta tabla el factor A corresponde al tipo de aditivo, el factor B al porcentaje de aditivo y el factor C al porcentaje de carbón.

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1 PRUEBA DE VISCOSIDAD APARENTE

En la Gráfica 11 se muestra la relación entre la velocidad de cizalla (en RPM), la cantidad de carbón y la viscosidad aparente en el CWS para el aditivo ácido cítrico con una concentración del 1%. Se observa que al aumentar la velocidad de cizalla la viscosidad aparente disminuye, mostrándose un comportamiento pseudoplástico. Esto ocurre cuando la velocidad de cizalla aumenta (>0 RPM) generando así el rompimiento de los aglomerados o conjunto de partículas de carbón, proporcionando una mejor fluidez de suspensión, es decir, un decrecimiento en la viscosidad. De igual forma se muestra y como reportan Mishra, Senapati y Panda²⁷ a medida que la concentración de carbón aumenta se generan fuerzas de fricción interparticular que al ser significativas tienen como consecuencia un incremento de la viscosidad aparente.

Gráfica 11. Relación viscosidad aparente contra la velocidad de cizalla a dos concentraciones de carbón para las muestras de CWS con 1% de ácido cítrico.



²⁷ Mishra, Senapati. Op. Cit., p. 164.

En las demás muestras la tendencia entre la viscosidad y el porcentaje de carbón es contraria a lo dicho anteriormente. Esto se puede apreciar en la tabla 29. Aun así este comportamiento se puede presentar como lo indican Mishra, Senapati y Panda²⁸. Algunas de las causas por las cuales se presenta dicho comportamiento pueden ser en primera instancia la falta de homogeneidad en la muestra de carbón, el hecho de que el tamaño de partícula no es de 63 micras, sino que es una mezcla de distintos diámetros inferiores al valor mencionado y que existe un tiempo prolongado entre la preparación de las muestras y el análisis de viscosidad de las mismas generando un cambio en la estabilidad que como consecuencia trae cambios en la viscosidad. Por último, los aditivos tienen un poder de dispersión que puede variar según el porcentaje de carbón usado.

De acuerdo a los resultados obtenidos en la tabla 29. se observa la disminución de viscosidad de las suspensiones a partir de los blancos cuya viscosidad aparente es 906,41 y 628,82 mPaS para las concentraciones de carbón 55% y 50% respectivamente. Este decrecimiento en la viscosidad aparente se debe a la interacción fisicoquímica que se presenta entre las partículas superficiales del carbón y las partículas de aditivo, logrando cubrir la superficie de los granos del mismo aumentando la hidrofobicidad; generando así que una menor cantidad de moléculas de agua entren en contacto con dicha superficie y además se evita la formación de aglomerados de las partículas.

A continuación, se presenta el porcentaje de disminución para las 16 muestras de CWS:

Tabla 30. Porcentajes de disminución de viscosidad aparente.

| Muestra | Porcentaje de disminución | |
|---------------------|---------------------------|---------|
| | Original | Replica |
| 50% A. Cítrico 0,8% | 39,74 | 35,29 |
| 50% NaOH 0,8% | 39,65 | 32,75 |
| 50% A. Cítrico 1% | 47,92 | 42,43 |
| 50% NaOH 1% | 8,48 | 1,22 |
| 55% A. Cítrico 0,8% | 65,59 | 62,06 |
| 55% NaOH 0,8% | 64,07 | 59,11 |
| 55% A. Cítrico 1% | 63,47 | 59,46 |
| 55% NaOH 1% | 53,31 | 49,04 |

²⁸ Ibid., p. 162.

En la anterior tabla se expone el efecto sobre la viscosidad del tipo y concentración de aditivo en las suspensiones CWS. Se observa que entre los dos aditivos utilizados, el ácido cítrico da las reducciones de viscosidad más grandes tanto para cargas de sólidos de 50 y 55%. La concentración de 0,8% de los aditivos en la mayoría de los casos arroja las viscosidades más bajas, después de esta cantidad se presenta un incremento en la viscosidad como consecuencia de una sobresaturación de aditivo. Altas concentraciones de aditivo este puede actuar como un estabilizante facilitando un aumento en la viscosidad.

4.2 PRUEBA DE GRAVEDAD ESPECÍFICA

La densidad de suspensión es un parámetro importante a tener en cuenta durante el transporte y almacenamiento, los rangos aceptables dependen enteramente de las aplicaciones. Se encuentra que el CWS con una concentración de 55% de carbón y 0,8% de ácido cítrico presenta densidad de 1,20 g/ml ligeramente inferior a la de una formulación con hidróxido de sodio (1,22 g/ml) a las mismas condiciones, esto infiere que el ácido cítrico no afecta en gran medida la densidad mejorando las propiedades funcionales como viscosidad y estabilidad. Los resultados obtenidos son aproximados a los registrados por COTES²⁹, para una planta de Novosibirsk.

4.3 PRUEBA DE PH

Teniendo en cuenta los resultados de esta prueba (tabla 26), se observa la relación presente entre la viscosidad aparente y el pH para las muestras con ácido cítrico donde estas variables están relacionadas inversamente, es decir, al existir un incremento en una la otra decrece. Lo anterior se debe a que el pH se encuentra estrechamente relacionado con la carga de la superficie de las partículas de carbón donde esta última genera la atracción o repulsión entre dichas partículas. La carga de superficie está conformada por los grupos funcionales que contienen oxígeno y los iones inorgánicos presentes en suspensión, además de que tiene una relación directa con el pH. Cuando el pH de la suspensión es alto la carga de superficie es también alta lo que genera una interacción de repulsión entre las partículas provocando una suspensión dispersa en donde la viscosidad aparente es baja.

²⁹ Serant, F. y Agapov, K. Development and Application of Promising Technologies for Firing Coal-Water Fuels. Russian Federation: Novosibirsk, 2008.

De manera análoga ocurre para el caso inverso, en donde al tener un pH bajo y una la carga de superficie baja se generan interacciones de atracción formando aglomerados produciendo como consecuencia una viscosidad aparente alta³⁰.

Lo anterior no se aplica para la muestra 55% NaOH 0,8% por lo que esta contiene un aditivo distinto a las demás suspensiones a las que se les realizó la prueba de pH. Cabe destacar que esta muestra produjo un pH de 8,4, debido a que el aditivo NaOH aporta aniones OH⁻ a la suspensión acercándose así más a la basicidad.

4.4 PRUEBA PUNTO DE FLUIDEZ.

Los valores obtenidos en la tabla 27 (entre -5 y -4°C) de este parámetro son altos en comparación con otros combustibles (para algunos biodiesel y derivados del petróleo el punto de fluidez está alrededor de los -30°C³¹), por lo que un componente de gran importancia en el CWS es el agua, provocando así que el punto de fluidez de la suspensión sea cercano al punto de fluidez del agua.

Así mismo se infiere que solo se tendrá problemas en el transporte por tubería y almacenamiento para las zonas con estaciones o una temperatura ambiente de varios grados bajo cero por lo que si se alcanza el punto de fluidez o una temperatura inferior se genera obstrucción de tuberías y grandes dificultades en el llenado y vaciado de tanques con la suspensión.

El punto de fluidez está estrechamente relacionado con la viscosidad porque al acercarse a esta temperatura la capacidad de flujo de la suspensión disminuye, provocando por consiguiente un incremento significativo en la viscosidad aparente del combustible.

³⁰ Ishra, SK. Op. Cit., p. 160.

³¹ Benjumea, Pedro Nel; AGUDELO, John Ramiro y RÍOS, Luis Alberto. Propiedades de flujo a baja temperatura del biodiesel de aceite de palma. En: REVISTA FACULTAD DE INGENIERÍA. 2007.no. 42, p. 94-104.

4.5 PRUEBA PODER CALORÍFICO

En las suspensiones el poder calorífico se reduce considerablemente como consecuencia del porcentaje de agua presente. Esta es una variable a controlar mediante la concentración de carbón. El cálculo de la energía perdida durante la evaporación del agua se calcula a través la siguiente expresión:

Ecuación 4. Porcentaje de energía perdida

$$\% EPE = \frac{\text{Evaporación perdida}}{\text{calor de combustión}} * 100\%$$

El calor latente de evaporización del agua a temperatura de ebullición es cerca de 2300 kJ/kg y los respectivos calores de combustión se encuentran en la sección 3.1.5, a partir de estos datos es posible obtener el porcentaje de energía perdida para cada una de las muestras³².

Tabla 31. Porcentaje de pérdidas de energía

| Muestra | Porcentaje de energía |
|---------------------|-----------------------|
| 55% NaOH 0,8% | 8,02 |
| 50% A. Cítrico 1% | 8,16 |
| 55% A. Cítrico 0,8% | 8,11 |

La muestra de cálculo de este porcentaje de pérdida de energía se encuentra en el ANEXO E.

Una concentración de carbón del 50% como es de esperarse presenta las mayores pérdidas de energía; en el caso de concentraciones de 55% las pérdidas se ven reducidas como consecuencia de un aumento en la carga de sólidos que aportan poder calorífico adicional.

³² Laskowski, Janusz S. Op. Cit., p. 319.

El poder calorífico del carbón bituminoso es de 7509 Kcal/Kg que dista en aproximadamente un 10 % de los calores de combustión en base seca obtenidos en bomba calorimétrica. Estos cambios se pueden relacionar con un aumento en las cenizas y humedad propias del carbón.

4.6 INFLUENCIA DE VARIABLES SOBRE VISCOSIDAD

4.6.1 Análisis de varianza. La tabla 32. Muestra el análisis de varianza para el diseño factorial 2^3 de las muestras de CWS con un $\alpha=0,05$.

Tabla 32. Análisis de varianza CWS.

| Término | Efecto | Coefficiente | Grados de libertad | Suma de cuadrados | Cuadrados medios | Valor F | Valor P |
|-------------------------------|--------|--------------|--------------------|-------------------|------------------|---------|---------|
| Tipo de Aditivo (A) | 93,84 | 46,92 | 1 | 35224 | 35224 | 47,72 | 0 |
| Concentracion de Aditivo (B) | 66,18 | 33,09 | 1 | 17520 | 17520 | 23,73 | 0,001 |
| Concentracion de Carbon (C) | -67,33 | -33,66 | 1 | 18132 | 18132 | 24,56 | 0,001 |
| AB | 79,59 | 39,8 | 1 | 25339 | 25339 | 34,33 | 0 |
| AC | -37,08 | -18,54 | 1 | 5499 | 5499 | 7,45 | 0,026 |
| BC | -8,28 | -4,14 | 1 | 274 | 274 | 0,37 | 0,559 |
| ABC | -43,05 | -21,52 | 1 | 7412 | 7412 | 10,04 | 0,013 |
| Dentro de tratamientos | | | 8 | 5906 | 738,25 | | |

Este análisis demuestra la significancia estadística de cada uno de los términos sobre la viscosidad aparente. Para este caso seis de los siete valores de P son menores al α indicando una gran significancia sobre la variable de respuesta, teniendo un nivel de confianza del 95%.

A través de los efectos de cada termino se observa el cambio promedio en la viscosidad aparente ya sea generando un incremento (valores positivos) o un decrecimiento (valores negativos).

4.6.2 Prueba de hipótesis. Con los valores de F obtenidos del análisis de varianza y al compararlos con el F proveniente de las tablas de distribución se demuestra en forma de hipótesis la existencia o no del efecto de cada término sobre la viscosidad aparente.

Las hipótesis para este diseño factorial son las que se muestran a continuación:

$H_0: \alpha=0$ No hay efecto del tipo de aditivo sobre la viscosidad aparente.

$H_i: \alpha \neq 0$ Hay efecto del tipo de aditivo sobre la viscosidad aparente.

$H_0: \beta=0$ No hay efecto de la concentración de aditivo sobre la viscosidad aparente.

$H_i: \beta \neq 0$ Hay efecto de la concentración de aditivo sobre la viscosidad aparente.

$H_0: \mu = 0$ No hay efecto de la concentración de carbón sobre la viscosidad aparente.

$H_i: \mu \neq 0$ hay efecto de la concentración de carbón sobre la viscosidad aparente.

$H_0: \alpha\beta = 0$ No hay efecto de la interacción entre el tipo de aditivo y la concentración de aditivo sobre la viscosidad aparente.

$H_i: \alpha\beta \neq 0$ Hay efecto de la interacción entre el tipo de aditivo y la concentración de aditivo sobre la viscosidad aparente.

$H_0: \alpha\mu = 0$ No hay efecto de la interacción entre el tipo de aditivo y la concentración de carbón sobre la viscosidad aparente.

$H_i: \alpha\mu \neq 0$ Hay efecto de la interacción entre el tipo de aditivo y la concentración de carbón sobre la viscosidad aparente.

$H_0: \beta\mu = 0$ No hay efecto de la interacción entre la concentración de aditivo y la concentración de carbón sobre la viscosidad aparente.

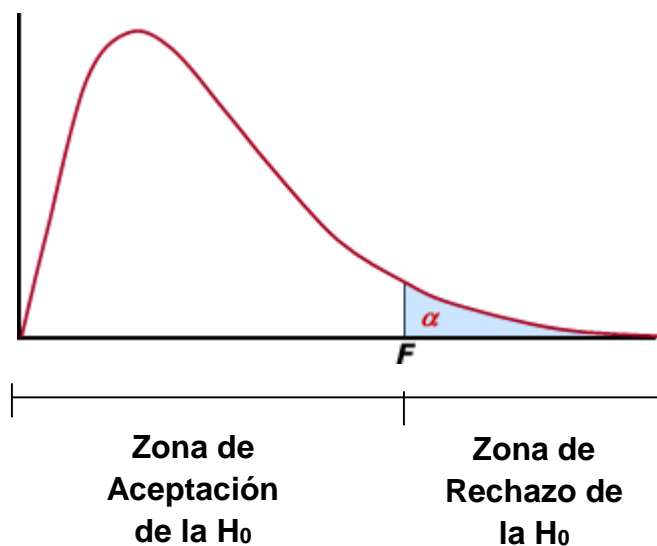
$H_i: \beta\mu \neq 0$ Hay efecto de la interacción entre la concentración de aditivo y la concentración de carbón sobre la viscosidad aparente.

$H_0: \alpha\beta\mu = 0$ No hay efecto de la interacción entre el tipo de aditivo, la concentración de aditivo y la concentración de carbón sobre la viscosidad aparente.

$H_i: \alpha\beta\mu \neq 0$ Hay efecto de la interacción entre el tipo de aditivo, la concentración de aditivo y la concentración de carbón sobre la viscosidad aparente.

Teniendo en cuenta que el valor F de tablas es 5,32 y la Figura 11. se obtiene la respuesta final de la prueba de hipótesis.

Figura 11. Distribución F para diseños factoriales



De acuerdo a lo anterior todos los términos (tabla 32) a excepción de la interacción entre la concentración de aditivo y la concentración de carbón, tienen un efecto sobre la viscosidad aparente.

4.6.3 Regresión. Del diseño de experimentos se obtiene una regresión que se aproxima a la relación existente entre los factores de entrada y la variable de respuesta.

Ecuación 5. Regresión para las muestras de CWS

$$\text{Viscosidad} = 11997 - 7980A - 13553B - 208,8C + 9836AB + 140,1AC + 241,7BC - 172,2ABC$$

La tabla 33. muestra los resultados teóricos de viscosidad obtenidos con la regresión, además del porcentaje de error existente entre estos datos y los resultados experimentales.

Tabla 33. Porcentaje de error entre datos teóricos y experimentales

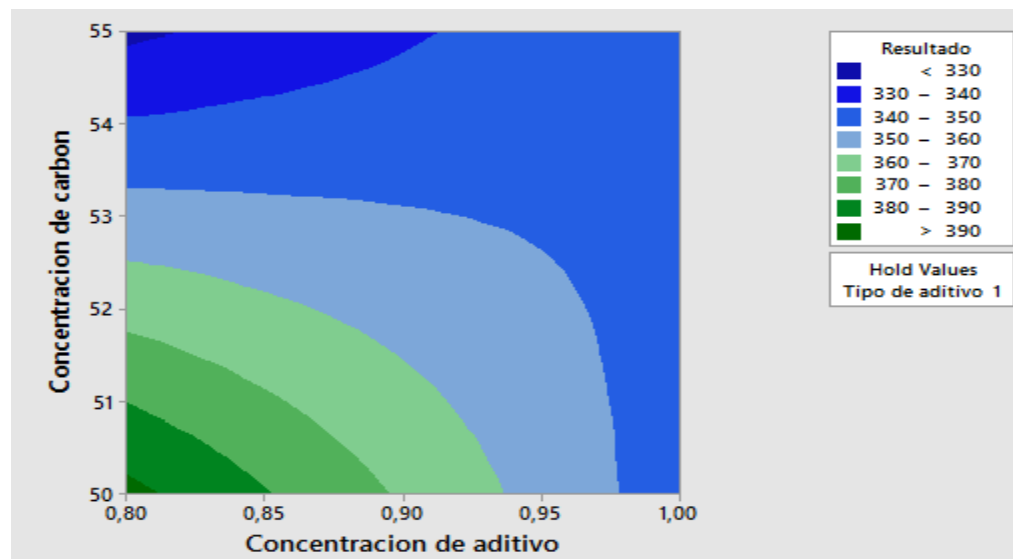
| Muestra | Regresión | Error | |
|---------------------|-----------|----------|---------|
| | | Original | Réplica |
| 50% A. Cítrico 0,8% | 388,40 | 2,43 | 4,77 |
| 50% NaOH 0,8% | 394,20 | 3,73 | 7,28 |
| 50% A. Cítrico 1% | 340,00 | 3,69 | 6,48 |
| 50% NaOH 1% | 591,00 | 2,62 | 5,10 |
| 55% A. Cítrico 0,8% | 322,90 | 3,40 | 6,51 |
| 55% NaOH 0,8% | 340,40 | 4,34 | 8,88 |
| 55% A. Cítrico 1% | 344,00 | 3,75 | 6,82 |
| 55% NaOH 1% | 434,50 | 2,59 | 6,31 |

Por los bajos porcentajes de error obtenidos se puede inferir que la regresión es una aproximación aceptable a los datos experimentales. A estos datos teóricos se le denominan también como valores ajustados.

La muestra de cálculo para la regresión se encuentra en el ANEXO E.

4.6.4 Representación gráfica. A través de la Gráfica 12 o grafica de contorno se puede identificar los rangos de viscosidad pertenecientes a unos valores de interacción entre variables independientes usando como aditivo el ácido cítrico.

Gráfica 12. Grafica de contorno que relaciona la viscosidad aparente con la concentración de aditivo y carbón para el aditivo ácido cítrico



5. CONCLUSIONES

- En el análisis y selección de materias primas a partir de la revisión bibliográfica se encontró que los carbones bituminosos de altos volátiles tipo B son los más usados en la preparación de CWS debido a un contenido de volátiles superior al 31% lo que permite que el proceso de ignición ocurra con mayor facilidad, tiene una humedad inherente inferior al 2%, así como un contenido de cenizas por debajo del 10% lo que ayuda a evitar la formación de escoria y por último un poder calorífico elevado que se encuentra entre 7227,05 Kcal/Kg y 7782,98 Kcal/Kg en comparación con los carbones sub bituminosos que poseen un poder calorífico en el rango de 5281,31 Kcal/Kg-6393,16 Kcal/Kg. El costo de este tipo de carbones es bajo (127,780\$/Kg) debido a la gran abundancia en las reservas del departamento. Los aditivos hidróxido de sodio y ácido cítrico se seleccionaron por su alta capacidad de dispersión, disponibilidad y bajo costo (2040\$/Kg para el hidróxido y 3460\$/Kg para el ácido).
- Las condiciones de operación para la obtención del CWS utilizadas son, para el carbón 50 y 55% en masa porque son las que proporcionaron mayor facilidad de manipulación a nivel experimental, además de que estas cantidades permiten un tiempo de preparación relativamente corto (20 minutos aproximadamente). A porcentajes de carbón superiores al 60%, el tiempo de mezclado se duplica o triplica con respecto a los porcentajes usados. Para la cantidad de aditivo se dispuso entre el rango de 0,8 a 1% en masa, estando este de acuerdo con los valores registrados en la literatura, además de que se produce el efecto deseado sobre la viscosidad evitando así el uso de estas sustancias a mayores cantidades. Se eligió un tamaño de partícula constante de 63µm el cual se encuentra dentro del rango de las partículas finas. El proceso de molienda produce una mezcla de distinta granulometría con valores igual o menores a las 63µm lo que puede generar irregularidades en las propiedades de las suspensiones.
- Al realizar las pruebas de caracterización a una concentración de 55% de carbón y 0,8% de ácido cítrico se obtiene la viscosidad más baja de 311,92 mPaS siendo esta la mejor formulación en el rango de viscosidades determinado. Independientemente de las concentraciones de los componentes presentes en la suspensión los resultados de pH se acercan a la neutralidad (suspensiones no corrosivas) como es el caso de la formulación mencionada con anterioridad que tiene un pH de 7,82 o en el caso de la suspensión con hidróxido de sodio una ligera alcalinidad como consecuencia de la naturaleza química de los aditivos. La formulación 55% de carbón y 0,8% de ácido cítrico posee un poder calorífico en base seca de 6776 Kcal/Kg con una pérdida de energía producida

por el agua del 8,11% observándose una disminución de este parámetro con respecto al carbón sólido. La densidad de esta suspensión es de 1,20 g/ml siendo un valor cercano al agua.

6. RECOMENDACIONES

- Se sugiere emplear una molienda en húmedo debido a su alta eficiencia, permitiendo un contacto más íntimo entre partículas, lo que se traduce en menores tiempos de residencia en el proceso de molienda y finalmente se obtienen tamaños de partículas inferiores a los obtenidos en un proceso en seco. Tener en cuenta que las muestras de carbón al finalizar el proceso no requieren ser llevadas a una etapa de secado porque estas tendrán que ser mezcladas con agua.
- Realizar un estudio de estabilidad (velocidad de sedimentación) en suspensiones mediante adición de aditivos espesantes como Carboximetilcelulosa, teniendo en cuenta que grandes cantidades de dichos aditivos pueden generar un efecto negativo en la viscosidad. Este estudio mejorara el transporte y almacenamiento del combustible.
- Formular suspensiones con altas carga de solidos de hasta un 70% lo que amplía la aplicación de CWS a calderas industriales.
- Evaluar el efecto de los cambios de temperatura y pH en la viscosidad aparente.
- Analizar los gases de combustión en las suspensiones y a partir de ello determinar el impacto ambiental.
- Realizar un análisis financiero que permita determinar la factibilidad del proyecto.
- Evaluar la viscosidad aparente mediante el uso de aditivos diseñados para CWS y aditivos comercialmente disponibles a diferentes concentraciones.

BIBLIOGRAFIA

ASTM INTERNATIONAL. Standard Test Method for Pour Point of Petroleum Products. 16 ed. EE. UU: ASTM. 2016. 6 pág.

ASTM INTERNATIONAL. Standard Classification of Coals by Rank. ASTM D388-12. 12 ed. Washington, D.C.: ASTM. 2012. 7 pág.

BENJUMEA, Pedro Nel; AGUDELO, John Ramiro y RÍOS, Luis Alberto. Propiedades de flujo a baja temperatura del biodiesel de aceite de palma. En: REVISTA FACULTAD DE INGENIERÍA. 2007.no. 42, p. 94-104.

CATAMUTÚN. Carbón. [en línea]. región de los ríos, Chile. 2015. [Consultado el 25 de septiembre de 2015] Disponible en: <http://rgantzw.wix.com/catamutun>.

DAS, Debadutta, et al. Improving stability of concentrated coal–water slurry using mixture of a natural and synthetic surfactants. En: FUEL PROCESSING TECHNOLOGY. 2013.vol. 113, p. 41-51.

DINCER, H., et al. The effect of chemicals on the viscosity and stability of coal water slurries. En: INTERNATIONAL JOURNAL OF MINERAL PROCESSING. 2003. vol. 70, no. 1, p. 41-51.

HOPP, Vollrath. Principios Fundamentales De Química. En: Fundamentos De Tecnología Química. España: Reverté, 2005. 54-60 p.

IMITOLA ACERO, Oscar Uriel. La Cadena del Carbón. Generalidades. Bogotá D.C (Colombia). 2012. ISBN 958-97750-0-4.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACION. Documentación. Presentación de tesis trabajos de grado y otros trabajos de investigación. NTC 1486. Sexta actualización, Bogotá: en instituto, 2008. 36 p.

_____. Referencias bibliográficas, contenido, forma, y estructura. NTC 5613. Bogotá: el Instituto, 2008. 36 p.

_____. Referencias documentales para fuentes de informaciones electrónicas. NTC 4490. Bogotá: el instituto, 1998. 23 p.

KLIMPEL, R. R. The selection of wet grinding chemical additives based on slurry rheology control. En: POWDER TECHNOLOGY. noviembre, 1999.vol. 105, no. 1–3, p. 430-435.

LASKOWSKI, Janusz S. Chapter 10 Fine-Coal Utilization. En: Coal Flotation and Fine Coal Utilization. Vancouver, Canadá: 2001. 307-351 p. ISBN 0167-4528.

LEE, Sunggyu y H, Kimberly. Coal-Water Slurries. En: Particle Technology and Applications. Estados Unidos: 2012. 111-122 p.

MILLER, Bruce G. Coal Energy Systems. En: RICHARD C. DORF. Introduction to Coal. Estados Unidos: Academic Press, 2004. 1-2 p.

MISHRA, SK; SENAPATI, PK y PANDA, D. Rheological behavior of coal-water slurry. En: ENERGY SOURCES. 2002.vol. 24, no. 2, p. 159-167.

MÖBIUS, R. MILLER, V.B. Chemistry of surfactants. En: Surfactants Chemistry, Interfacial Properties, Applications. 1 ed. Ucrania: MÖBIUS, D. MILLER, R. 2001. p. 1-53.

MOHAPATRA, SK y KUMAR, Satish. Effect of additive on the rheological properties of coal slurry. En: THE PROCEEDINGS OF 28th INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOLID WASTE TECHNOLOGY AND MANAGEMENT. 2013.vol. 1, no. 45, p. 1376-1381.

MONTGOMERY, Douglas C. Diseño y Análisis De Experimentos. México: Limusa. 2 ed. México: LIMUSA WILEY, 2002. 686 p. ISBN 968-18-6156-6.

PRIMO YÚFERA, Eduardo. Ácidos Carboxílicos. En: [Anónimo] Química Orgánica Básica y Aplicada: De La Molécula a La Industria. España: REVERTÉ, 1995. 543-560 p.

RAMACHANDRAN, Prakash; TSAI, Ching-Yi y SCHANCHE, Gary W. Use of Cwsf in Compact Boilers. En: [Anónimo] An Evaluation of Coal Water Slurry Fuel Burners and Technology. 2nd ed. Estados Unidos: DTIC Document, 1992. 11-13 p.

SAH, B.K; Srivastava, S.B; y Bandopadhyay. Effect of Additives on the Rheological Characteristics of Coal-Water Slurries. En: Venugopal R. Mineral Processing Technology. New Delhi, Sharma T, 2005. p. 267- 274.

SERANT, F. y AGAPOV, K. Development and Application of Promising Technologies for Firing Coal-Water Fuels. Russian Federation: Novosibirsk, 2008.

Universidad Industrial de Santander. BOLETÍN DE GEOLOGÍA. En: PUBLINDEX. 2009.vol. 25, no. 41, p. 6-18.

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO. [en línea]. México (UNAM). 2015. 20 de septiembre de 2015]. Disponible en: <http://portalacademico.cch.unam.mx/alumno/quimica1/unidad1/mezclas/suspensiones>.

VARIALI, B. CWS State of the Art. En: [Anónimo] Coal-Water Slurry Contribution to the European Economic Community's Energy. University of Rome: 1989. 1-10 p.

World Coal Association. The Coal Resources: A Comprehensive Overview of Coal. [en línea]. Putney, London. 2005. [Consultado el 21 septiembre de 2015] Disponible en: <https://www.worldcoal.org/coal/what-coal>.

ANEXOS

ANEXO A
EVIDENCIAS FOTOGRÁFICAS PREPARACIÓN CWS



Carbón Pulverizado antes del tamizado



Tamizado manual del carbón pulverizado



Muestra de CWS




Medición de pH con pH metro



Prueba de Viscosidad aparente con viscosimetro brookfield

ANEXO B

RESULTADOS DE CARACTERIZACIÓN DE CARBÓN Y PODER CALORÍFICO DEL CWS



Interlabco S.A.S.
LABORATORIO QUÍMICO INTERNACIONAL

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

Villa de San Diego de Ubaté, Febrero 19 de 2013

Señores
COACPROCOL LTDA
Zipaquirá

Ref. 38817
O.T. 12464

→ ASTM D-388 → High volatile B bituminous coal

CERTIFICADO DE CALIDAD


*¡Mejoramos continuamente:
Conocimiento, información e inteligencia
al servicio de nuestros clientes*

Nosotros INTERLABCO S.A.S. certificamos que hemos PREPARADO y ANALIZADO UNA (01) MUESTRA(S) de CARBON, recibida(s) el día 18 de Febrero de 2013 a las 16:30 horas y los resultados obtenidos son los siguientes según normas ASTM.

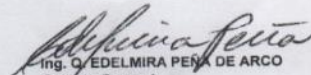
| | | | |
|---------------------------|-----------------------------------|--|--|
| IDENTIFICACION: | MUESTRA GRANULADO ALARCON. | | |
| FECHA DE ANALISIS: | Febrero 19 de 2013 | | |

| | RESULTADOS COMO SE RECIBE | BASE SECA | METODO ASTM |
|------------------------|------------------------------|-----------|------------------|
| HUMEDAD TOTAL, % | 1,91 | | D 3302-02a |
| CENIZAS, % | 9,43 | 9,62 | D 3174- 04 |
| MATERIA VOLATIL, % | 36,80 | 37,52 | D 3175-02 |
| CARBONO FIJO, % | 51,85 | 52,86 | D 3172 |
| AZUFRE, % | 0,91 | 0,93 | D 4239 04a |
| P. CALORIFICO, Kcal/Kg | 7509 | 7655 | D 5865-10a |
| FSI | | 4 1/2 | D 720-091 (2004) |

APROBADO POR:



EDGAR J. GONZALEZ MELO
Jefe de Laboratorio



Ing. C. EDELMIRA PEÑA DE ARCO
Gerente General
M.P. 1354

FLOR EMILCE CARRILLO
Directora Gestión Calidad
Firma Autorizada

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

ASESORÍAS, CONSULTORÍAS Y CAPACITACIÓN
EN TODAS LAS LÍNEAS DE SERVICIO.

Calle 5 No. 8 - 37 Ubaté (Cundinamarca, Colombia)
 Teléfax: (571) 889 0389 - 855 3644 - 869 1349
 Celulares: 300 219 0875 - 321 453 1295
 E-mail: gerencia@interlabco.com - gestioncalidad@interlabco.com
 servicioalcliente@interlabco.com / Chat: gerenciainterlabco@yahoo.es
 PAGINA WEB: www.interlabco.com

LINEA DE ATENCIÓN AL CLIENTE: SUGERENCIAS, QUEJAS Y RECLAMOS. CEL.: 321 453 1296 GERENCIA GENERAL

Caracterización y poder calorífico de carbón mineral



Interlabco S.A.S.

LABORATORIO QUÍMICO INTERNACIONAL

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

Villa de San Diego de Ubaté, 5 de Abril de 2016

Ref. 45649
O.T. 15267

Señor
JHON ALEJANDRO ROMERO MORALES
Ciudad

CERTIFICADO DE CALIDAD

*Mejoramos continuamente
Conocimiento, Información e Integridad
al servicio de nuestros Clientes*

Nosotros, INTERLABCO S.A.S., certificamos que hemos PREPARADO y ANALIZADO una (1) muestra(s) de SUSPENSION, recibida(s) el día 31 de Marzo de 2016 a las 14:40 horas, y los resultados obtenidos son los siguientes según normas ASTM.

IDENTIFICACION: MUESTRA 50% A. CITRICO 1%
FECHA DE ANALISIS: ABRIL 5 DE 2016

RESULTADOS

| DETERMINACION | BASE SECA | METODO ASTM |
|---------------------------|-----------|--------------|
| PODER CALORIFICO, Kcal/Kg | 6852 | D 5865 - 11a |

LUZMARY ORTIZ
Inspector de Calidad
Firma Autorizada



CARLOS JAVIER OBANDO
Inspector de Calidad
Firma Autorizada

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

Muestreo, Preparación y Análisis Físicoquímicos de carbones, coques, minerales, aguas, suelos, alimentos, foliar, lácteos, y medios filtrantes como gravas, arenas, antracitas y Productos Químicos en General.

ASESORÍAS, CONSULTORÍAS Y CAPACITACIÓN
EN TODAS LAS LÍNEAS DE SERVICIO.

Calle 5 No. 8 - 37 Ubaté (Cundinamarca, Colombia)
Telefax: (571) 889 0389 - 855 3644 - 889 1349
Celulares: 300 219 0875 - 321 453 1296 (WhatsApp)
E-mail: gerencia@interlabco.com - gestioncalidad@interlabco.com
serviciocliente@interlabco.com / Chat: gerenciainterlabco@yahoo.es
PAGINA WEB: www.interlabco.com

LÍNEA DE ATENCIÓN AL CLIENTE: SUGERENCIAS, QUEJAS Y RECLAMOS. CEL.: 321 453 1296 GERENCIA GENERAL

Resultado poder calorífico muestra 50% carbón y 1% ácido cítrico



Interlabco S.A.S.

LABORATORIO QUÍMICO INTERNACIONAL

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

Villa de San Diego de Ubaté, 5 de Abril de 2016

Ref. 45650
O.T. 15267

Señor
JHON ALEJANDRO ROMERO MORALES
Ciudad

CERTIFICADO DE CALIDAD

*Mejoramos continuamente
Conocimiento, Información e Inteligencia
al servicio de nuestros Clientes*

Nosotros, INTERLABCO S.A.S., certificamos que hemos PREPARADO y ANALIZADO una (1) muestra(s) de SUSPENSION, recibida(s) el día 31 de Marzo de 2016 a las 14:40 horas, y los resultados obtenidos son los siguientes según normas ASTM.

IDENTIFICACION: MUESTRA 55% A. CITRICO 0,8%
FECHA DE ANALISIS: ABRIL 5 DE 2016

RESULTADOS

| DETERMINACION | BASE SECA | METODO ASTM |
|---------------------------|-----------|--------------|
| PODER CALORIFICO, Kcal/Kg | 6732 | D 5865 - 11a |


LUZ BARRANTZ ORTIZ
Inspector de Calidad
Firma Autorizada


ING. G. EDELMIRA PENA DE ARCO
Gerente GENERAL
C.P. 1354


CARLOS JAVIER OBANDO
Inspector de Calidad
Firma Autorizada

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

Muestreo, Preparación y Análisis Físicoquímicos de carbones, coques, minerales, aguas, suelos, alimentos, foliar, lácteos, y medios filtrantes como gravas, arenas, antracitas y Productos Químicos en General.

ASESORÍAS, CONSULTORÍAS Y CAPACITACIÓN
EN TODAS LAS LÍNEAS DE SERVICIO.

Calle 5 No. 8 - 37 Ubaté (Cundinamarca, Colombia)
Telefax: (571) 889 0389 - 855 3644 - 889 1349
Celulares: 300 219 0875 - 321 453 1296 (WhatsApp)
E-mail: gerencia@interlabco.com - gestioncalidad@interlabco.com
servicioalcliente@interlabco.com / Chat: gerenciainterlabco@yahoo.es
PAGINA WEB: www.interlabco.com

LÍNEA DE ATENCIÓN AL CLIENTE: SUGERENCIAS, QUEJAS Y RECLAMOS. CEL.: 321 453 1296 GERENCIA GENERAL

Resultado poder calorífico muestra 55% carbón y 0,8% ácido cítrico



Interlabco S.A.S.

LABORATORIO QUÍMICO INTERNACIONAL

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

Villa de San Diego de Ubaté, 5 de Abril de 2016

Ref. 45651
O.T. 15267

Señor
JHON ALEJANDRO ROMERO MORALES
Ciudad

CERTIFICADO DE CALIDAD

*Mejoramos continuamente
Conocimiento, Información e Inteligencia
al servicio de nuestros Clientes*

Nosotros, INTERLABCO S.A.S., certificamos que hemos PREPARADO y ANALIZADO una (1) muestra(s) de SUSPENSION, recibida(s) el día 31 de Marzo de 2016 a las 14:40 horas, y los resultados obtenidos son los siguientes según normas ASTM.

IDENTIFICACION: MUESTRA 55% A. NaOH 0,8%
FECHA DE ANALISIS: ABRIL 5 DE 2016

RESULTADOS

| DETERMINACION | BASE SECA | METODO ASTM |
|---------------------------|-----------|--------------|
| PODER CALORIFICO, Kcal/Kg | 6776 | D 5865 - 11a |



Luz Dary Ortiz
LUZ DARY ORTIZ
Inspector de Calidad
Firma Autorizada

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

Carlos Javier Obando
CARLOS JAVIER OBANDO
Inspector de Calidad
Firma Autorizada

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

Muestreo, Preparación y Análisis Físicoquímicos de carbones, coques, minerales, aguas, suelos, alimentos, foliar, lácteos, y medios filtrantes como gravas, arenas, antracitas y Productos Químicos en General.

ASESORÍAS, CONSULTORÍAS Y CAPACITACIÓN
EN TODAS LAS LÍNEAS DE SERVICIO.


Calle 5 No. 8 - 37 Ubaté (Cundinamarca, Colombia)
Telefax: (571) 889 0389 - 855 3644 - 889 1349
Celulares: 300 219 0875 - 3 21 453 1296 (WhatsApp)
E-mail: gerencia@interlabco.com - gestioncalidad@interlabco.com
serviciocliente@interlabco.com / Chat: gerenciainterlabco@yahoo.es
PAGINA WEB: www.interlabco.com

LÍNEA DE ATENCIÓN AL CLIENTE: SUGERENCIAS, QUEJAS Y RECLAMOS: CEL - 321 453 1296 GERENCIA GENERAL

Resultado poder calorífico para muestra 55% carbón y 0,8% Sosa caustica

ANEXO C

COSTOS



Interlabco S.A.S.

LABORATORIO QUÍMICO INTERNACIONAL
 International Laboratories of Coal - Inspection Services - Quality Control
 Calidad Total y Transparencia
 NIT.: 830.025.520 - 8 / IVA RÉGIMEN COMÚN

Resolución autorización Dian No. 320001125964
 del 2014-03-27 Habilitación facturas UB 5001
 hasta 7000

FACTURA DE VENTA
 No. UB **5680**

Interlabco S.A.S., realiza muestreo, preparación y análisis físicoquímicos de carbones, coques, minerales, aguas, suelos, alimentos, foliar, lácteos y medios filtrantes como gravas, arenas, antracitas, y productos químicos en general. Asesorías, consultorías y capacitación en todas las líneas de servicio.

| | | | |
|-------------|----------------------|--------------|---------------|
| SEÑOR (ES): | JHON ROMERO | NIT.: | 1.072.494.485 |
| DIRECCIÓN: | Calle 128b BIS 54-59 | CÓDIGO: | |
| TELÉFONO: | 3184956619 | | |
| CIUDAD: | BOGOTA | SOLICITANTE: | |

| FECHA DE EMISIÓN | | | FECHA DE VENCIMIENTO | | |
|------------------|-----|-----|----------------------|-----|-----|
| DÍA | MES | AÑO | DÍA | MES | AÑO |
| 01 | 12 | 15 | 01 | 12 | 15 |

FORMA DE PAGO: **CONTADO**

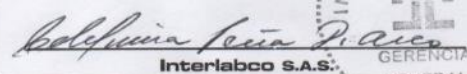
| Cantidad | Descripción | Valor Unitario | Valor Total |
|----------|---|----------------|-------------|
| 1 | REFERENCIA: O.T. 14965 PREPARACIÓN, ANALISIS DE PULVERIZACION, TAMIZADO MALLA No.230 63 MICRAS A MUESTRA DE CARBON MINERAL. FAVOR CONSIGNAR BANCO AV VILLAS CTA.AHORROS No.452127525 a NOMBRE DE INTERLABCO S.A.S. CANCELADO | 300.000 | 300.000 |

| | | |
|---|-----------------|-------------------|
| SON: | SUBTOTAL | \$ 300.000 |
| TRESCIENTOS CUARENTA Y OCHO MIL PESOS M/CTE. | IVA | 48.000 |
| | TOTAL | \$ 348.000 |

Si dentro de los Cinco (5) días calendario, siguientes al recibo de ésta y del trabajo, no se notificase al despachador ninguna observación, se entenderá perfeccionado el contrato y no se aceptarán devoluciones ni reclamos (Art. 912 Inciso 2 del Código de Comercio). La presente es una Factura de Venta y es un título valor Ley 1231/2008. Si no se reclama dentro de los 5 (cinco) días siguientes a su recepción se considera irrevocable y se da por aceptada por el comprador ó el solicitante del servicio. A esta factura de venta le son aplicables las normas relativas a la letra de cambio Art. 5 Ley 1231/2008 y Art. 621 y 774 del Código de Comercio. **NOTA:** Esta factura causará intereses de mora al máximo legal vigente a partir de la fecha de vencimiento. Todo pago con cheque que sea devuelto por el banco, por cualquier causal tendrá una sanción adicional del 20% sobre el importe del cheque de acuerdo al Art. 722 y 731 del Código de Comercio. Actividad Económica 7120 IVA Régimen Común.

FAVOR CANCELAR PERSONALMENTE EN OFICINA DE INTERLABCO S.A.S. Calle 5 No. 8 - 37 Ubaté, Cund.

RECUERDE QUE EL PAGO OPORTUNO DE SUS FACTURAS LE GARANTIZAN UN BUEN HISTORIAL CREDITICIO.

| | |
|---|---|
| Atentamente:  Interlabco S.A.S. <small>GERENCIA GENERAL</small> | Recibido y Aceptada: <hr style="border: 0; border-top: 1px solid black; margin: 5px 0;"/> Firma y Sello C.C. o NIT. |
|---|---|

www.interlabco.com * Calle 5 No. 8 - 37 Ubaté, Cundinamarca, Colombia. * Telefax: (571) 889 0389 - 855 3644 - 889 1349
 Celulares: 300 219 0875 - 321 453 1296 * e-mail: gerencia@interlabco.com - gestioncalidad@interlabco.com -
 laboratorio@interlabco.com - servicioalcliente@interlabco.com - secretaria@interlabco.com Chat: gerenciainterlabco@yahoo.es

Costos pulverización carbón mineral a malla No 230



PRODUMALLAS R.C. S.A.S
PRODUCTORA DE MALLAS CRIBA

REMISIÓN No. **7062**

SEÑORES: ROMERO MORALES JHON ALEJANDRO FECHA: 24 de Diciembre de 2015 PEDIDO No. 5754
DIRECCIÓN: CALLE 128 B BIS 58 34 CIUDAD: BOGOTÁ O.C. AUT 15-713

DESPACHAMOS A UD(S) LOS SIGUIENTES ARTICULOS

| REFERENCIA | CANTIDAD | DESCRIPCIÓN DEL ARTICULO |
|------------|----------|--|
| | 1.00 | TAMIZ MALLA INOX Ø 63 MICRAS (TAMIZMINO XØ63MIC) |

OBSERVACIONES: _____
DESPACHADO POR: *ANDECA Huíñez* TRANSPORTADO POR: _____ RECIBIDO POR: _____

Calle 21 No. 18 B - 45 • P.B.X. 743 5711 - 743 5712 • FAX: 743 5713 Bogotá D.C. • CELULARES: 310 213 1328 - 310 488 2100
www.produmallas.com • E-mail: servicioalcliente@produmallas.com

| | |
|-----------|------|
| DESCUENTO | 0.00 |
|-----------|------|

| | | |
|--|------------------|---------|
| SITIO DE ENTREGA: RECOGEN | | |
| SON: CIENTO TREINTA Y TRES MIL CUATROCIENTOS PESOS | SUB-TOTAL \$ | 115,000 |
| La presente FACTURA DE VENTA (Ley 1231/2008) se asimila en todos, sus efectos legales a la Letra de Cambio (C. De Art.774 Nral. 5). La firma puesta por terceros en representación, mandato u otra calidad similar a nombre del comprador implica su obligación de acuerdo al Artículo 640 del Código de Comercio o igualmente constancia de la entrega real y material de la mercancía. | I.V.A. \$ | 18,400 |
| | TOTAL A PAGAR \$ | 133,400 |

La mercancía viaja por cuenta y riesgo del comprador, reservandonos el derecho de Propiedad hasta su total cancelación. Después de 10 días de recibida la mercancía, no se aceptan devoluciones ni reclamos. Código de Comercio Artículos 944, 945, 947.
FAVOR GIRAR CHEQUE ÚNICAMENTE A NOMBRE DE PRODUMALLAS R.C. S.A.S. O CONSIGNAR EN LA CUENTA CORRIENTE BANCOLOMBIA No: 239-61945220

ACEPTADA
FECHA DE RECIBIDO: _____
NOMBRE: _____ C.C.: _____

PRODUMALLAS R.C. S.A.S.
PRODUCTORA DE MALLAS CRIBA
ANDECA Huíñez
FIRMA Y SELLO

Calle 21 No. 18 B - 45 • P.B.X. 743 5711 - 743 5712 • FAX: 743 5713 Bogotá D.C. • CELULARES: 310 213 1328 - 310 488 2100
www.produmallas.com • E-mail: servicioalcliente@produmallas.com

Costo tamiz malla No 230



Interlabco S.A.S.

LABORATORIO QUÍMICO INTERNACIONAL

International Laboratories of Coal - Inspection Services - Quality Control

Calidad Total y Transparencia

NIT.: 830.025.520 - 8 / IVA RÉGIMEN COMÚN

Interlabco S.A.S., realiza muestreo, preparación y análisis fisicoquímicos de carbones, coques, minerales, aguas, suelos, alimentos, foliar, lácteos y medios filtrantes como gravas, arenas, antracitas, y productos químicos en general. Asesorías, consultorías y capacitación en todas las líneas de servicio.

Resolución Autorización DIAN
No.320001381085 del 2016-03-29
Habilitación Facturas No.UB 5896 hasta UB
10000

FACTURA DE VENTA

No. UB **5922**

| | | | | | | | | |
|-------------|--|------------------|-------------------------------|-----|----------------------|-----|-----|-----|
| SEÑOR (ES): | JHON ALEJANDRO ROMERO MORALES NIT.: 1.072.494.485 | FECHA DE EMISIÓN | | | FECHA DE VENCIMIENTO | | | |
| DIRECCIÓN: | CALLE 128b BIS 54-59 | CÓDIGO: | DÍA | MES | AÑO | DÍA | MES | AÑO |
| TELÉFONO: | 3184956619 | | 05 | 04 | 16 | 05 | 04 | 16 |
| CIUDAD: | BOGOTA | SOLICITANTE: | FORMA DE PAGO: CONTADO | | | | | |

| Cantidad | Descripción | Valor Unitario | Valor Total |
|----------|---|----------------|-------------|
| 3 | <p>REFERENCIA: O.T. 15267</p> <p>PREPARACIÓN, ANALISIS DE PODER CALORIFICO A MUESTRAS DE SUSPENSION.</p> <p>IDENTIFICACION: 1. MUESTRA 50% A CITRICO 1% 2.MUESTRA 55% NaOH 0,8%. 3. MUESTRA 55% A CITRICO 0,8%</p> <p>FAVOR CONSIGNAR BANCO AV VILLAS CTA.AHORROS No.452127525 a NOMBRE DE INTERLABCO S.A.S.</p> <p>CANCELADO</p> | 39.224 | 117.672 |

| | | | |
|------|---|----------|------------|
| SON: | CIENTO TREINTA Y SEIS MIL QUINIENTOS PESOS M/CTE. | SUBTOTAL | \$ 117.672 |
| | | IVA | 18.828 |
| | | TOTAL | \$ 136.500 |

Si dentro de los Cinco (5) días calendario, siguientes al recibo de ésta y del trabajo, no se notificase al despachador ninguna observación, se entenderá perfeccionado el contrato y no se aceptarán devoluciones ni reclamos (Art. 912 Inciso 2 del Código de Comercio). La presente es una Factura de Venta y es un título valor Ley 1231/2008. Si no se reclama dentro de los 5 (cinco) días siguientes a su recepción se considera irrevocable y se da por aceptada por el comprador o el solicitante del servicio. A esta factura de venta le son aplicables las normas relativas a la letra de cambio Art. 5 Ley 1231/2008 y Art. 621 y 774 del Código de Comercio. **NOTA:** Esta factura causará intereses de mora al máximo legal vigente a partir de la fecha de vencimiento. Todo pago con cheque que sea devuelto por el banco, por cualquier causal tendrá una sanción adicional del 20% sobre el importe del cheque de acuerdo al Art. 722 y 731 del Código de Comercio. Actividad Económica 7120 IVA Régimen Común.

FAVOR CANCELAR PERSONALMENTE EN OFICINA DE INTERLABCO S.A.S. Calle 5 No. 8 - 37 Ubaté, Cund.
RECUERDE QUE EL PAGO OPORTUNO DE SUS FACTURAS LE GARANTIZAN UN BUEN HISTORIAL CREDITICIO.

| | |
|----------------------------|---------------------------|
| Atentamente: | Recibido y Aceptada: |
| | |
| Interlabco S.A.S. GERENCIA | Firma y Sello C.C. o NIT. |

www.interlabco.com * Calle 5 No. 8 - 37 Ubaté, Cundinamarca, Colombia. * Telefax: (571) 889 0389 - 855 3644 - 889 1349
Celulares: 300 219 0875 - 321 453 1296 e-mail: gerencia@interlabco.com - gestioncalidad@interlabco.com - laboratorio@interlabco.com - servicioalcliente@interlabco.com - secretaria@interlabco.com - Chat: gerenciainterlabco@yahoo.es

Costos pruebas poder calorífico

| Tipo de Carbón | Valor (\$ /ton) | Valor (\$ /Kg) |
|---|------------------------|-----------------------|
| Carbón bituminoso de bajos volátiles | 280.275 | 280,275 |
| Carbón bituminoso de medios volátiles | 182.235 | 182,235 |
| Carbón bituminoso de altos volátiles tipo B | 127.780 | 127,780 |
| Carbón bituminoso de altos volátiles tipo C | 122.450 | 122,450 |



Costos distintos tipos de carbones según COACPROCOL LTDA

| Aditivo | Valor (\$/Kg) | Valor (\$/gal) |
|---|----------------------|-----------------------|
| Lignosulfonato de Sodio (C ₂₀ H ₂₄ Na ₂ O ₁₀ S ₂) | 7.438 | |
| Carbonato de Sodio (CaCO ₃) | 3.700 | |
| Silicato de Sodio (Na ₂ SiO ₃) | | 10.000 |
| Ácido Cítrico (C ₆ H ₈ O ₇) | 3.460 | |
| Hidróxido de Sodio (NaOH) | 2.040 | |

Costos distintos tipos de aditivos para CWS según Proquimol

ANEXO D

FICHAS DE SEGURIDAD DE LOS ADITIVOS

| Nombre: Acido Citrico | | Código NFPA | Identificación de riesgos |
|---|---|---|---------------------------|
| <p style="text-align: center;">Propiedades físicas y químicas</p> <p>Fórmula Química: (HOOCCH₂)₂C(OH)COOH</p> <p>Peso molecular: 192,13 g/mol</p> <p>Apariencia física: Sólido, incoloro, inodoro, sabor agrio, agradable</p> <p>Solubilidad: 1330 g/l</p> <p>Densidad relativa: 1,665</p> <p>Temperatura de auto ignición: 345° C</p> <p>Punto de fusión: 153° C (descomposición)</p> <p>Punto de ebullición: Descomposición</p> <p>pH: 1,7 (10 g/l H₂O a 20° C)</p> |  |  <p style="text-align: center; font-weight: bold; font-size: 1.2em;">CORROSIVO</p> | |
| <p style="text-align: center;">Efectos para la salud</p> <p>Inhalación: Irritación de nariz y garganta, dificultad para respirar.</p> <p>Ingestión: Irritación en el tracto gastrointestinal. Dificultad para respirar. Moderadamente tóxico.</p> <p>Contacto con los ojos: Irritación severa de los ojos.</p> <p>Contacto con la piel: Riesgo de irritaciones.</p> | <p style="text-align: center;">Primeros Auxilios</p> <p>Inhalación: Llevar a un lugar fresco y bien aireado.</p> <p>Ingestión: Enjuagar boca y suministrar agua fresca. Si no estuviera consciente no suministre nada por la boca. No provocar vomito. En todos los casos consulte con un medico inmediatamente o traslade a la persona al hospital.</p> <p>Contacto con los ojos: En caso de salpicadura en los ojos, enjuagar con abundante agua manteniendo los parpados abiertos.</p> | | |
| <p style="text-align: center;">Estabilidad y reactividad</p> <p>Estable bajo condiciones normales de uso. Mantenga estrictamente las condiciones de manipulación y almacenamiento mencionadas. Evitar el calentamiento fuerte. Materiales y sustancias que se deben evitar por posibles reacciones violentas:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Metales. • Oxidantes. • Bases. • Agentes reductores. | <p style="text-align: center;">Medidas en caso de fugas accidentales</p> <ul style="list-style-type: none"> • Evitar la formación de polvo. No inhalar el polvo. Evitar el contacto con la sustancia. Ventilar el área si fuera un lugar cerrado. • Utilizar equipo de protección adecuado. • No añada productos químicos. • Recoger en seco y eliminar los residuos. Enjuagar con abundante agua el sector. • De ninguna manera devolver el producto recuperado al envase original. • No tirar a los desagües. | | |
| <p style="text-align: center;">Medidas para extinción de incendios</p> <ul style="list-style-type: none"> • Mantener alejado de fuentes de ignición. • Combustible. En caso de que el producto se viera envuelto en un incendio pueden formarse vapores de combustión o vapores ☒ peligrosos. • Las partículas finamente dispersas forman mezclas explosivas en el aire. • Intervenir siempre con agua desde una distancia prudencial, siendo también adecuados otros métodos de extinción como CO₂, espuma o ☒ polvo seco. • Utilizar mascarar con sistema de respiración artificial y equipo de protección adecuado en caso de intervención. Avisar inmediatamente a los bomberos si pasara a mayores. | <p style="text-align: center;">Manejo y almacenamiento</p> <p>Manipulación:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Operar en área bien ventilada y fresca. • La evaporación a los 20° C es despreciable; sin embargo se puede alcanzar rápidamente una concentración molesta de partículas en el aire. • Nunca devuelva el producto no utilizado al envase original. • Utilice protección personal adecuada para tal fin. <p>Almacenamiento:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Conservar en área ventilada y fresca alejado de fuentes de calor (entre +5° C y +30° C). ☒ • Mantenga cerrado con todo su empaque original. • Mantenga lejos de productos incompatibles • No usar recipientes metálicos. | | |
| <p style="text-align: center;">Información Toxicológica</p> <p>Toxicidad aguda: DL50 oral rata: 3000 mg/Kg.</p> <p>Ensayo irritación ocular (conejo): Fuerte irritación.</p> <p>Ensayo irritación cutánea (conejo): Irritaciones leves.</p> | <p style="text-align: center;">Información sobre el transporte</p> <ul style="list-style-type: none"> • Denominación técnica: Ácido Cítrico Anhidro. • No sometido a las normas de transporte. <p>Bajo ninguna circunstancia alterar su embalaje original (envases primario, secundario y terciario). No transportar con alimentos y piensos.</p> | | |

Ficha de Seguridad Acido Citrico

| Nombre: Hidróxido de potasio | | |
|--|--|---|
| Sinónimos: Soda Cáustica, Lejía | | |
| Propiedades físicas y químicas | Código NFPA | Identificación de riesgos |
| Fórmula química: KOH Peso molecular: 56,102g/mol Apariencia física: Sólido blanco o amarillo, apariencia cristalina Solubilidad: >10% en agua, soluble en alcohol y glicerina Densidad relativa: 2,044 Punto de ebullición: 1370°C Punto de fusión: 360°C |  |  CORROSIVO |
| Efectos para la salud | Primeros Auxilios | |
| Inhalación: Tos, sofocación, dolor en nariz, boca y garganta, quemaduras. Ingestión: Quemaduras en tracto digestivo, vómito con sangre y mucosa, dolor abdominal. Contacto con los ojos: Dolor y quemaduras. Contacto con la piel: Irritación, ulceración, quemaduras y dolor. | Inhalación: Llevar a la víctima a un lugar fresco, obtener atención médica. Ingestión: Lavar la boca con agua, no inducir vómito, buscar atención médica. Contacto con los ojos: Lavar con agua por 15 minutos, elevando los párpados para remover el químico. Si hay irritación, acudir al médico. Contacto con la piel: Lavar por 15 minutos con agua y jabón, lavar ropa contaminada antes de usarla, buscar ayuda médica. | |
| Estabilidad y reactividad | Protección personal | |
| Estabilidad: Estable. Incompatibilidad: Agua en grandes cantidades. Condiciones a evitar: Agua, ácidos fuertes, metales, materiales combustibles, materiales orgánicos, Zn, Al, Sn, CO ₂ , organohalógenados, anhídrido maléfico. Productos de descomposición: Hidrógeno. | Sistema de ventilación: Ventilación local y/o general. Respiradores personales: Protector facial de 20 cm de espesor, respirador contra polvos. Protección de la piel: Guantes, overol de caucho de butilo, caucho natural, neopreno, PVC, nitrilo, SBR. Protección de los ojos: Gafas de seguridad a prueba de polvo. | |
| Medidas para extinción de incendios | Control de exposición | |
| Fuego: La combustión produce hidrógeno y óxido de K. Explosión: Evitar calor y humedad. Medios de extinción de incendios: Polvo químico, CO ₂ , halón, agua en forma de neblina, espuma. | No establecido | |
| | Información Toxicológica | |
| | DL50 oral en ratas: 273 mg/Kg | |
| Manejo y almacenamiento | DL50 oral rata macho: 365 mg/Kg | |
| Almacenar en lugares frescos, ventilados y secos, temperaturas menores a 360°C. | LD50 piel de conejos: 5 mg/24 horas | |

Ficha de seguridad Hidróxido de Sodio

ANEXO E
MUESTRA DE CALCULOS

- Gravedad específica:

$$G_{s_{CWS}} = \frac{\rho_{CWS}}{\rho_{H_2O}}$$

Ejemplo para muestra 55% NaOH 0,8%:

$$G_{s_{CWS}} = \frac{1,22g/ml}{1g/ml} = 1,22g/ml$$

- Efectos de los factores en la variable respuesta:

$$Efecto A = \frac{1}{4n} [a + ab + ac + abc - (1) - b - c - bc]$$

Ejemplo para el factor tipo de aditivo:

$$Efecto A = \frac{1}{8} [802,41 + 1196,61 + 696,25 + 885,14 - 785,85 - 689,5 - 655,82 - 698,53] = 93,84$$

- Teorema del punto medio:

$$\frac{1}{b-a} \int_a^b f(x) dx$$

Ejemplo para muestra original de 55% NaOH 0,8%:

$$\frac{1}{60-20} \int_{20}^{60} 5176,5x^{-0,767} dx = \frac{1}{40} \left[\frac{5176,5}{0,233} (60^{0,233} - 20^{0,233}) \right] = 325,63$$

- Porcentaje de energía perdida:

$$\% EPE = \frac{Evaporación\ perdida}{calor\ de\ combustión} * 100\%$$

Ejemplo para muestra 55% NaOH 0,8%:

$$\%EPE = \frac{0,45 * 549,7132\text{Kcal/Kg}}{0,55 * 6852\text{Kcal/Kg}} * 100 = 8,02\%$$

- Regresión:

$$\begin{aligned} \text{Viscosidad} = & 11997 - 7980A - 13553B - 208,8C + 9836AB \\ & + 140,1AC + 241,7BC - 172,2ABC \end{aligned}$$

Ejemplo para muestra 55% NaOH 0,8%:

$$\begin{aligned} \text{Viscosidad} = & 11997 - (7980 * 2) - (13553 * 0,8) - (208,8 * 55) + (9836 * 2 * 0,8) \\ & + (140,1 * 2 * 55) + (241,7 * 0,8 * 55) - (172,2 * 2 * 0,8 * 55) = 340,4 \end{aligned}$$