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

## RESUMEN TRABAJO DE GRADO

AUTOR:

NOMBRE(S): MARIA CONSTANZA

APELLIDOS: TRUJILLO VALDERRAMA

FACULTAD: INGENIERÍA

PLAN DE ESTUDIOS: INGENIERÍA MECANICA

DIRECTOR:

NOMBRE(S): LUIS EMILIO

APELLIDOS: VERA DUARTE

NOMBRE(S): \_\_\_\_\_

APELLIDOS: \_\_\_\_\_

TÍTULO DEL TRABAJO (TESIS): DISEÑO DE UNA CÁMARA Y ESTABLECIMIENTO DEL PROCESO PARA LA PRODUCCIÓN DE SEMICOQUE, UTILIZANDO LA ENERGÍA DE LOS HUMOS GENERADOS EN LAS BATERÍAS DE HORNO DE LA PRODUCCIÓN DE COQUE

Al pasar de los tiempos, el carbón se ha convertido en el combustible principal de las grandes industrias permitiendo la innovación de esta materia prima, este es cuestionado por los efectos negativos sobre el medio ambiente y por esta razón se realiza esta investigación donde se muestra las ventajas y características del semicoque.

El semicoque se obtiene de diferentes maneras y una de ellas es con la utilización de la energía residual del proceso de coquización para la transformación de carbón de baja calidad (alta materia volátil), aplicando este método se reducen costos ya que se mezclan carbones de diferentes clases (contenido de materia volátil) para obtener un elemento de buena calidad; hay que tener claro que el semicoque es un valor agregado del carbón que es utilizado por industrias químicas, metalúrgicas e industrias de fabricación de gas esto gracias a sus emisiones mínimas a la hora de utilizarlo.

PALABRAS CLAVES: MEDIO AMBIENTE, SEMICOQUE, ENERGIA RESIDUAL, COQUIZACIÓN,

MATERIA VOLÁTIL.

CARACTERÍSTICAS:

PÁGINAS: 92 PLANOS: 0 ILUSTRACIONES: 36 CD ROOM: 1

DISEÑO DE UNA CÁMARA Y ESTABLECIMIENTO DEL PROCESO PARA LA  
PRODUCCIÓN DE SEMICOQUE, UTILIZANDO LA ENERGÍA DE LOS HUMOS  
GENERADOS EN LAS BATERÍAS DE HORNOS DE LA PRODUCCIÓN DE COQUE

MARIA CONSTANZA TRUJILLO VALDERRAMA

UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER

FACULTAD DE INGENIERÍA

PLAN DE ESTUDIOS DE INGENIERÍA MECÁNICA

SAN JOSÉ DE CÚCUTA

2021

DISEÑO DE UNA CÁMARA Y ESTABLECIMIENTO DEL PROCESO PARA LA  
PRODUCCIÓN DE SEMICOQUE, UTILIZANDO LA ENERGÍA DE LOS HUMOS  
GENERADOS EN LAS BATERÍAS DE HORNOS DE LA PRODUCCIÓN DE COQUE

MARIA CONSTANZA TRUJILLOVALDERRAMA

Trabajo de grado presentado como requisito para optar por el título de:

INGENIERO MECÁNICO

Director:

LUIS EMILIO VERA DUARTE

Ing. Mecánico. Mg

UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER

FACULTAD DE INGENIERÍA

PLAN DE ESTUDIOS DE INGENIERÍA MECÁNICA

SAN JOSÉ DE CÚCUTA

2021

## ACTA DE SUSTENTACIÓN DE UN TRABAJO DE GRADO

FECHA: CÚCUTA, 28 DE OCTUBRE 2021  
HORA: 4:00 P.m.  
LUGAR: PLATAFORMA VIRTUAL GOOGLE MEET  
PLAN DE ESTUDIOS: INGENIERÍA MECÁNICA

TÍTULO: "DISEÑO DE UNA CÁMARA Y ESTABLECIMIENTO DEL PROCESO PARA LA PRODUCCIÓN DE SEMICOQUE UTILIZANDO LA ENERGÍA DE LOS HUMOS GENERADOS EN LAS BATERÍAS DE HORNOS DE LA PRODUCCIÓN DE COQUE."

Jurados: Ing. CARMEN LEONOR BARAJAS FORERO  
Ing. FAUSTINO MORENO GAMBOA


Director: ING. LUIS EMILIO VERA DUARTE

Nombre del estudiante	Código	Calificación	
		Letra	Número
MARÍA CONSTANZA TRUJILLO VALDERRAMA	1120866	Cuatro, Cero	4.0

### APROBADA

  
Ing. CARMEN LEONOR BARAJAS FORERO

  
Ing. FAUSTINO MORENO GAMBOA.

  
Vo.Bo. GONZALO DE LA CRUZ ROMERO GARCÍA  
Coordinador Comité Curricular  
Ingeniería Mecánica



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

Cúcuta,

Señores,  
BIBLIOTECA EDUARDO COTE LEMUS  
Ciudad

Cordial saludo:

Yo, María Constanza Trujillo Valderrama, identificado con la C.C. N° 1093786548, autor de la tesis y/o trabajo de grado titulado DISEÑO DE UNA CÁMARA Y ESTABLECIMIENTO DEL PROCESO PARA LA PRODUCCIÓN DE SEMICOQUE, UTILIZANDO LA ENERGÍA DE LOS HUMOS GENERADOS EN LAS BATERÍAS DE HORNOS DE LA PRODUCCIÓN DE COQUE presentado y aprobado en el año 2021 como requisito para optar al título de Ingeniero Mecánico; autorizo a la biblioteca de la Universidad Francisco de Paula Santander, Eduardo Cote Lamus, para que con fines académicos, muestre a la comunidad en general a la producción intelectual de esta institución educativa, a través de la visibilidad de su contenido de la siguiente manera:

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

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

María Constanza Trujillo Valderrama  
C.C. 1093786548

	<b>Contenido</b>	<b>Pág</b>
	Introducción	13
1.	Descripción del problema	15
1.1	Planteamiento del problema	15
1.2	Justificación	16
1.3	Precios y consumo mundial de coque y semicoque	17
1.4	Beneficios Tecnológicos	19
1.5	Beneficios Económicos	20
1.6	Beneficios Sociales	20
1.7	Beneficios institucionales y empresariales	20
1.8	Objetivos	21
1.8.1	Objetivo general	21
1.8.2	Objetivo específico	21
1.9	Delimitaciones	21
2.	Marco Referencial	22
2.1	Antecedentes	22
2.2	Marco Teórico	25
2.2.1	Semicoque	25
2.2.2	Producción de semicoque	27

2.2.3 Tipos de hornos	28
2.2.4 Mercado	31
2.2.5 Composición del carbón, coque y semicoque	32
2.2.6.1 Composición del coque	33
2.2.6.2 Composición de semicoque	33
3. Metodología	35
3.1 Precios y consumo mundial de coque y semicoque	35
3.2 Caracterización de humos	35
3.3 Diseño de elementos o herramientas para ensayos de laboratorio	36
3.4 Análisis de ensayo de laboratorio	37
3.5 Validación de métodos experimentales utilizados	38
3.6 Diseño de la cámara para producción de semicoque	38
4. Resultados	39
4.1 Caracterización de humos	39
4.2 Diseño de elementos o herramientas para ensayos de laboratorio	50
4.3 Análisis de ensayo de laboratorio	51
4.3.1 Análisis general de ensayo	55
4.3.2 Evaluación de resultados de las muestras analizadas en laboratorio Carbomax	56
4.3.2.1 PRUEBA DE 500°C en dos rampas de tiempo	57
4.3.2.2 PRUEBA DE 550°C en 1 hora aumenta – 1 hora se mantiene	58

4.3.2.3 PRUEBA DE 600°C en 1 hora aumenta – 1 hora se mantiene	58
4.3.2.4 PRUEBA DE 650°C en 1 hora aumenta – 1 hora se mantiene	58
4.3.2.5 PRUEBA DE 700°C en 1 hora aumenta – 1 hora se mantiene	59
4.3.3.1 PRUEBA DE 500°C 1 hora sube a temperatura y media hora se mantiene	60
4.3.3.2 PRUEBA DE 550°C 1 hora sube a temperatura y media hora se mantiene	60
4.3.3.3 PRUEBA DE 600°C 1 hora sube a temperatura y media hora se mantiene	60
4.3.3.4 PRUEBA DE 650°C 1 hora sube a temperatura y media hora se mantiene	61
4.3.3.5 PRUEBA DE 700°C 1h sube a temperatura y media hora se mantiene	61
4.4 Validación de métodos experimentales utilizados	66
4.5 Cálculos térmicos	78
4.6 Diseño de la cámara para producción de semicoque	85
5. Bibliografía	90



<b>Lista de figuras</b>	<b>Pág</b>
Figura 1. Producción global de salida de carbón	17
Figura 2. Aranceles de importación más altos del año 2018	18
Figura 3. Horno de retorta	29
Figura 4. Representación gráfica de los hornos continuos Lambiotte a) Funcionamiento interno. b) Diagrama esquemático	30
Figura 5. Unidad de síntesis del metanol	31
Figura 6. Desprendimiento de volátiles	41
Figura 7. Caja utilizada para el análisis del carbón en la mufla. a. Vista Frontal b. Vista exterior. c. Vista interior	51
Figura 8. Horno o mufla utilizada. a. Vista frontal. b. Vista exterior	51
Figura 9. Termocupla Tipo k	51
Figura 10. Multímetro	51
Figura 11. Pistola infrarroja	51
Figura 12. Muestra final a 500°C en rampa de sostenimiento de una hora	57
Figura 13. Muestra final a 550°C en rampa de sostenimiento de una hora	58
Figura 14. Muestra final a 600°C en rampa de sostenimiento de una hora	58
Figura 15. Muestra final a 650°C en rampa de sostenimiento de una hora	58
Figura 16. Muestra final a 700°C en rampa de sostenimiento de una hora	59
Figura 17. Muestra final a 500°C en rampa de sostenimiento de media hora	60
Figura 18. Muestra final a 550°C en rampa de sostenimiento de media hora	60
Figura 19. Muestra final a 600°C en rampa de sostenimiento de media hora	60
Figura 20. Muestra final a 650°C en rampa de sostenimiento de media hora	61

Figura 21. Muestra final a 700°C en rampa de sostenimiento de media hora	61
Figura 22. Peso final del carbón respecto a la temperatura aplicado a 2 horas	69
Figura 23. Peso final del carbón respecto a la temperatura aplicado a 1 hora	70
Figura 24. Peso final del carbón respecto a la temperatura aplicado a la rampa de media hora	70
Figura 25. Peso final del carbón respecto a la temperatura aplicado a la rampa de 1 hora	71
Figura 26. Tiempo que tarda el carbón en igualar la temperatura de 700°C	72
Figura 27. Tiempo que tarda el carbón en igualar la temperatura de 600°C	73
Figura 28. Tiempo que tarda el carbón en igualar la temperatura de 550°C	74
Figura 29. Tiempo que tarda el carbón en igualar la temperatura de 500°C	75
Figura 30. Tiempo que tarda el carbón en igualar la temperatura de 700°C	76
Figura 31. Tiempo que tarda el carbón en igualar la temperatura de 650°C	77
Figura 32. Tiempo que tarda el carbón en igualar la temperatura de 550°C	78
Figura 33. Diseño demostrativo del sistema de producción de coque y semicoque	86
Figura 34. Elementos que conforman el diseño de semicoquización	86
Figura 35. Dimensiones horno de semicoque	87
Figura 36. Dimensiones de la caja a utilizar	87

<b>Lista de tablas</b>	<b>Pág</b>
Tabla 1. Diferencias generales entre el coque y semicoque	26
Tabla 2. Presenta las propiedades de las diferentes clases del carbón	32
Tabla 3. Propiedades o componentes del semicoque	34
Tabla 4. Propiedades del carbón para ensayo	36
Tabla 5. Gases producidos de acuerdo con la temperatura	40
Tabla 6. Descripción del comportamiento de los humos respecto a la temperatura en los ensayos realizados en el laboratorio (por observación)	41
Tabla 7. Comportamiento de la materia volátil con rampa de sostenimiento a 1 hora a temperatura de 600°C	42
Tabla 8. Comportamiento de la materia volátil con rampa de sostenimiento a 1 hora a temperatura de 650°C	44
Tabla 9. Comportamiento de la materia volátil con rampa de sostenimiento a ½ hora a temperatura de 650°C	45
Tabla 10. Comportamiento de la materia volátil con rampa de sostenimiento a 1 hora a temperatura de 700°C	47
Tabla 11. Comportamiento de la materia volátil con rampa de sostenimiento a ½ hora a temperatura de 700°C	48
Tabla 12. Resultados de muestras de carbón en 2 horas sin rampa de sostenimiento	52
Tabla 13. Resultado de muestras de carbón en 1 hora sin rampa de sostenimiento	54
Tabla 14. Resultados muestras analizadas por empresa Carbomax	56
Tabla 15. Comportamiento de los humos al iniciar segunda rampa en el tiempo de 1 hora	62

Tabla 16. Comportamiento de los humos al iniciar segunda rampa en el tiempo de media hora	62
Tabla 17. Comportamiento de materia volátil variando la temperatura y aplicando rampas de sostenimiento a 1 hora	63
Tabla 18. Comportamiento de materia volátil variando la temperatura y aplicando rampas de sostenimiento a ½ hora	64
Tabla 19. Análisis de temperaturas favorables para este ensayo	65
Tabla 20. Diferencias del carbón a diferente rampa de temperatura	66
Tabla 21. Análisis de la muestra a 700°C teniendo en cuenta el tiempo en que inicio el proceso	72
Tabla 22. <i>Análisis de la muestra a 600°C teniendo en cuenta el tiempo en que inicio el proceso</i>	73
Tabla 23. Análisis de la muestra a 550°C teniendo en cuenta el tiempo en que inicio el proceso	74
Tabla 24. Análisis de la muestra a 500°C teniendo en cuenta el tiempo en que inicio el proceso	75
Tabla 25. Análisis de la muestra a 700°C teniendo en cuenta el tiempo en que inicio el proceso	65
Tabla 26. Análisis de la muestra a 650°C teniendo en cuenta el tiempo en que inicio el proceso	76
Tabla 27. Análisis de la muestra a 550°C teniendo en cuenta el tiempo en que inicio el proceso	77

## **Introducción**

El aumento de la producción en industrias carboneras cada vez se extiende más, aunque el carbón como combustible es fuertemente cuestionado por los efectos negativos sobre el medio ambiente, pero, así como hay contradictores en su uso también hay defensores y además grandes consumidores, que lo necesitan para mantener su infraestructura de fabricación de múltiples productos. Debido a eso, la necesidad de innovar en su producción y en procesos de valor agregado al carbón. Dentro de los derivados del carbón se encuentra el coque, un material de gran riqueza y utilización en procesos industriales, en la producción del coque se generan gases combustibles (materia volátil) que combustionan dentro del ducto en el trayecto del horno a la chimenea y finalizan esparcidos en el medio ambiente. No obstante, realizar el proceso de coquización genera valores agregados que no pueden ser convenientes en el ámbito industrial debido a los aumentos de costos. Es por esto por lo que se indaga en el uso del semicoque.

Este proyecto propone la utilización de la energía residual del proceso de coquización para la transformación de carbón de baja calidad (alta materia volátil) a semicoque, es importante resaltar que en la región del Norte de Santander se concentra más en la producción de coque y para disminuir costos mezclan carbones de diferentes calidades, es decir, el contenido de materia volátil pues con este se obtiene el coque de buena calidad. Se pretende innovar sus procedimientos de fabricación e implementar en paralelo la producción de semicoque con carbón de mediana calidad para coquizar y convertirlo en semicoque, en la región el semicoque no se produce.

El semicoque es un producto como valor agregado al carbón, a su vez es materia prima de color negro claro, utilizado en industrias químicas, metalúrgicas e industrias de fabricación de

gas, ya que sus emisiones son mínimas a la hora de su utilización. Este producto es de baja volatilidad (10-15% de materia volátil), poca emisión de ceniza, y no daña la salud de la población; la calidad de este producto es alta y se distingue por quemarse sin humo, por esa razón es utilizado primordialmente para la calefacción doméstica y, como combustible productor de energía.

En países desarrollados como China, el semicoque se utiliza principalmente para la calefacción doméstica. China es uno de los países productores más grandes del mundo, junto con la India que es un gran exportador del semicoque. Por consiguiente, la adecuada implementación y producción de este combustible lo hace innovador en el mercado nacional, teniendo como beneficio bajo costo, lo cual, es llamativo para diferentes compradores.

El semicoque es una materia prima capaz de producirse en menor tiempo y menor temperatura, por esta razón se presenta este estudio para el diseño de una cámara con establecimiento del proceso para la producción de semicoque, utilizando la energía de los humos generados en las baterías de hornos de la producción de coque.

## 1. Descripción del problema

### 1.1 Planteamiento del problema

El proceso de transformación del carbón a coque genera un gran impacto económico, social y ambiental, en la mayoría de las plantas en Colombia, este se realiza en hornos cerrados circulares a altas temperaturas (1100 °C), contruidos con ladrillo común con techo en cúpula o domo conocidos como hornos colmena, en este proceso se elimina principalmente la materia volátil y algunos gases hidrocarburos atrapados dentro de este. Los hornos se agrupan en baterías de doble fila, y manejan la producción “en tandas”, cada horno tiene un ducto para la salida de los gases producidos que se conecta a un ducto central por donde avanzan los humos recolectados de toda la batería de hornos, luego son dirigidos a la chimenea. En este viaje debido a las altas temperaturas de los gases y de las paredes del ducto, los componentes aún combustibles y los hidrocarburos sólidos ( $C_mH_n$ ) expulsados con los humos se encienden y se transforman hasta completar la combustión, elevando la temperatura de estos (a 800 °C aproximadamente), antes de entrar a la chimenea, por donde son expulsados al medio ambiente.

Debido a su alta temperatura y a la cantidad de gases que se producen en cada batería, la energía que se pierde es apreciable, por eso este proyecto propuso diseñar una cámara y estableció el proceso para aprovechar parte de la energía que arrastran los humos y utilizarla para la producción de semicoque; logrando aumentar la eficiencia de la planta de coquización y disminuyendo el impacto ambiental causado por los gases.

El semicoque se obtiene por medio de la carbonización del carbón a temperaturas relativamente bajas, entre 550 y 650 °C; es recomendable que la temperatura no pase de los 700°C, ya que esto provocaría cambios en sus propiedades. Este producto presenta un atractivo a la hora de su compra ya que por lo general es más suave y friable que el coque.

Otras características del semicoque es que es un producto con baja volatilidad, poca emisión de ceniza, con bajo impacto sobre la salud de la población; la calidad de este producto es alta y se distingue por quemarse sin humo, por esta razón es utilizado primordialmente para la calefacción doméstica [1].

De acuerdo con lo planteado anteriormente surge la siguiente pregunta de investigación: **¿Es posible diseñar una cámara y establecer el proceso para la producción de semicoque que utilice como energía aquella que llevan los gases de las baterías de hornos para la producción de coque?**

## **1.2 Justificación**

El coque es uno de los principales productos de exportación de Norte de Santander teniendo un 87.5% del total de las exportaciones del departamento y una gran demanda en los mercados de Turquía, India y Gabón [2], su producción genera cerca de 22.000 empleos directos e indirectos [3].

Para la producción de coque se utiliza un carbón de mediana calidad (alta materia volátil), que en la actualidad para su aprovechamiento se mezcla con otro de buena calidad (baja materia volátil) y obtener carbón con porcentajes de materia volátil entre 30 y 40%, aptos para coquizar.

Al construir esta cámara para la obtención de semicoque y utilizando el carbón de mediana calidad, se aumenta la cantidad de carbón de alta calidad disponible para coquizar, lo que logra mejorar el índice de producción de coque de la planta, aumentando igualmente la eficiencia del proceso de coquización.



### 1.3 Precios y consumo mundial de coque y semicoque

Para la recolección de información acerca de precios y consumo mundial del carbón, coque y semicoque se utilizó algunas bases de datos que mostraron el comportamiento del carbón en el mundo respecto a la economía. Urgewald es una base de datos donde se encuentra diferente información, en este caso se utilizó para determinar la lista global de salida del carbón en cada país, las compañías que se encontraron están en India, China, USA, Suiza y Rusia. Estos países anualmente producen millones de toneladas, en la figura 1 se explica lo dicho anteriormente [4].

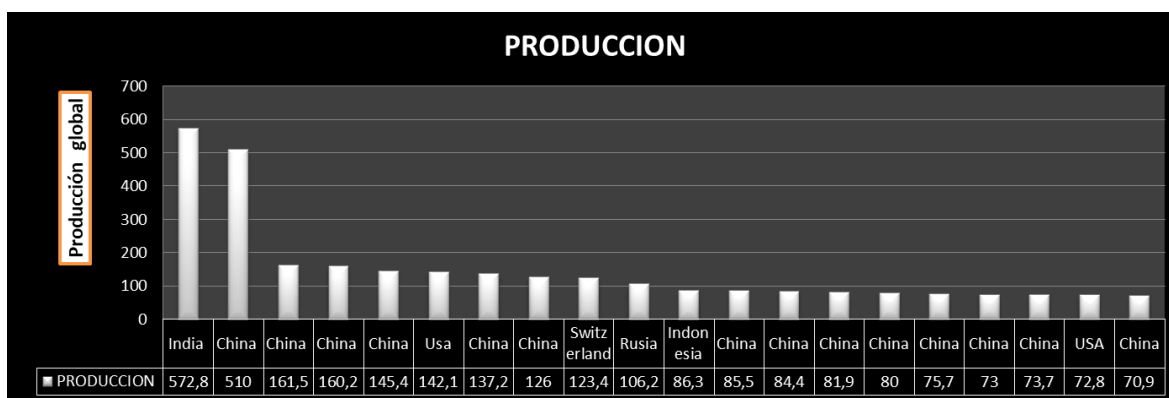
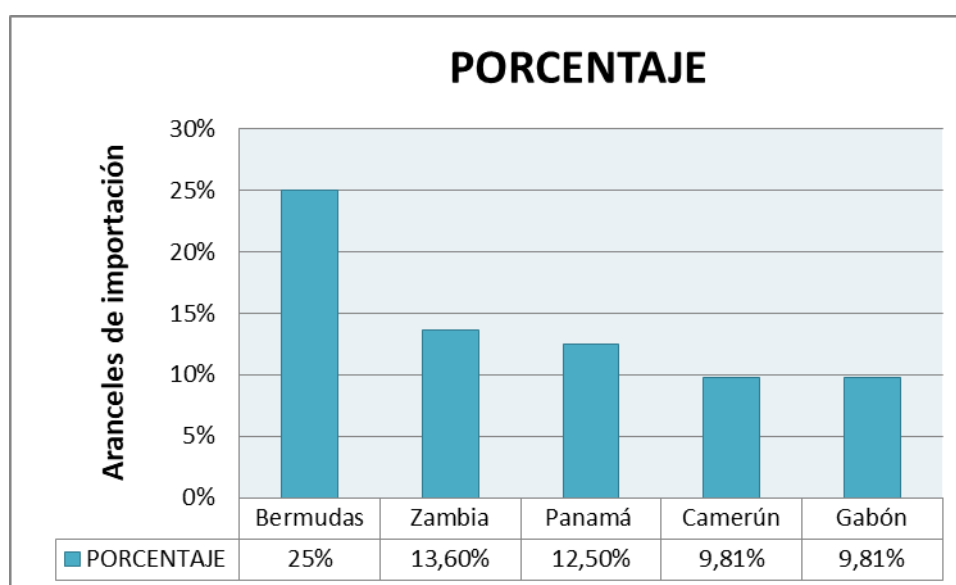


Figura 1. Producción global de salida de carbón. Tomado de [4].

Como se puede observar en la figura 1, en los índices de países que producen coque, China es el mayor productor a nivel mundial debido a que cuenta con una serie de empresas pequeñas que en conjunto lo llevan a ser uno de los países más competitivos. Asimismo, en la India se encuentra la empresa Coal India Ltd que es considerada como una de las productoras más grandes de coque en el mundo; aunque en la figura 1 la India no se repite tantas veces, en producción es que la que presenta mayor porcentaje con 572,8 millones de toneladas en el año.

En el año 2019 el coque, semicoque de carbón, lignito, turba y carbón de retorta fueron los productos más comercializados, eso lo dice la base de datos OEC esta muestra porcentajes en

crecimiento o disminución, importación, exportación y aranceles a nivel mundial, también brinda valores de comercio. Revisando esta plataforma se encontró que las materias primas mencionadas anteriormente tienen un total de 7,92 mil millones de dólares en el comercio total y que las exportaciones disminuyeron un -25,3% entre el año 2018 y 2019, estas exportaciones fueron a diferentes países como por ejemplo Polonia, Colombia, Rusia y Estados Unidos. Así como también se maneja las importaciones que hay a India, Alemania, Brasil, Malasia y México. En la siguiente tabla se representa en promedio los aranceles de importación.



*Figura 2.* Aranceles de importación más altos del año 2018. Tomado de [5].

Los aranceles son impuestos aplicados a objetos tipo importación o exportación, en la tabla anterior se muestra el valor de importación más alto en el año 2018 y como se observa Bermudas presenta mayor porcentaje con el 25%, esto indica que su precio de venta es más caro que en el mismo país de origen. Panamá cuenta con un porcentaje medio con 12,50% y Gabón disminuyó al 9,81%.

La salida de mercancías del país en el transcurso del 1 al 24 de agosto del 2019 coloca a Santa Marta en tercer lugar con el (12,3%) y su destino de exportación es hacia Brasil [6].

En las bases de datos mencionadas anteriormente (Urgewald y OEC) se logró identificar los precios del carbón, evidenciando su variación de acuerdo con el peso y tipo.

- Carbón coque bioespacio x 40 kg sustrato para cultivo \$27.776
- Carbón coque bioespacio x 20 kg sustrato para cultivo \$14.880
- Carbón coque bulto 40 kg \$27.776
- Carbón coque bulto De 30 A 33 kg la Leñería Bogotá \$38.000
- Carbón coque bulto 25 kg \$18.600
- Carbón coque paquete 1 kg \$2.480
- Carbón coque, calderas, agua, saco de 20 kg y a granel \$35.000
- Carbón coque para tratamientos de agua calderas, fundición \$35.000
- Carbón coque sacó x 20 kg y por mayor \$40.000
- Coque 1 kg sustrato mineral \$2.480
- Coque 20 kg sustrato mineral \$14.880
- Coque 5 kg sustrato mineral \$12.400

#### **1.4 Beneficios Tecnológicos**

Al implementar este tipo de modelos se renuevan las técnicas y elementos necesarios para la fabricación del semicoque, proporcionando información a diferentes bases de datos y permitiendo mejorar la investigación acerca del tema a partir de los datos obtenidos en diferentes estudios de laboratorio.

### **1.5 Beneficios Económicos**

Al implementar el diseño para la fabricación de semicoque se logra aumentar la eficiencia del proceso de producción de coque por la utilización que se le da a los carbones de alta calidad y carbones de baja calidad que se maneja en la producción de semicoque, lo que redundará en mayores índices de producción de coque por carga de carbón. La toma de decisiones en la compra de los elementos produce una inversión en un menor lapso.

### **1.6 Beneficios Sociales**

Al diseñar el horno para la producción de semicoque, se aumenta la eficiencia térmica del proceso de las plantas de coquización, reduciendo los efectos sobre el medio ambiente y obteniendo una mejoría en la calidad del aire para las personas que trabajan en estas plantas y los habitantes de las zonas cercanas, así mismo, al obtener un nuevo producto con alta demanda en el mercado internacional se aumentarán las oportunidades de trabajo en la región.

### **1.7 Beneficios institucionales y empresariales**

Desde el ámbito institucional de la Universidad Francisco de Paula Santander, el desarrollo de proyectos permite fortalecer el grupo de investigación, que a su vez aumenta los indicadores de investigación para fines de acreditación de alta calidad del programa de Ingeniería Mecánica.

Desde el ámbito empresarial, las industrias que trabajan en el campo de coquización pueden crear un proceso innovador y obtener un nuevo producto que va a optimizar sus plantas logrando aportar un valor agregado al carbón y desde luego un avance tecnológico para la región ofreciendo otro producto al mercado de estos combustibles.

## **1.8 Objetivos**

### **1.8.1 Objetivo general.**

Diseñar una cámara y establecer el proceso para la producción de semicoque utilizando parte de la energía de los gases que salen de las baterías de hornos utilizados en la producción de coque.

### **1.8.2 Objetivos específicos.**

- Recolectar información y métodos en la producción de coque y semicoque, precios y consumo mundial.
- Caracterizar los humos generados en las baterías de hornos colmena para la producción de coque.
- Realizar ensayos de laboratorio para determinar el tiempo y características para la producción de semicoque.
- Diseñar la cámara y establecer el proceso para la producción de semicoque, aprovechando la máxima la cantidad de energía de los gases de la producción de coque.

## **1.9 Delimitaciones**

El proyecto investigativo se realizó dentro de las instalaciones de la Universidad Francisco de Paula Santander, en los laboratorios de Fluidos y Térmicas del programa de Ingeniería Mecánica de la UFPS, con ayuda del laboratorista Alirio Rodríguez y el ingeniero Emilio Vera.

Se dispuso de una mufla u horno modelo D8 marca Terrígeno, una pistola infrarroja y una termocupla tipo k de 20 cm para determinar la temperatura del lecho de carbón.

Este proyecto se realizó en un tiempo de 18 meses para la investigación del diseño de una cámara y establecimiento del proceso para la producción de semicoque, utilizando la energía de los humos generados en las baterías de hornos de la producción de coque.

## 2. Marco Referencial

### 2.1 Antecedentes

A continuación, se darán a conocer los antecedentes que sirvieron como guía para la elaboración del proyecto; se tuvieron en cuenta estudios que relacionaran procesos de producción de semicoque, tipos de hornos y emisión de gases.

**Aprovechamiento de los gases generados por el horno Hoffman para mejorar la zona de secado en la ladrillera Ocaña** [4]. Este trabajo realizó un estudio para mejorar el proceso de secado en la ladrillera Ocaña aprovechando los gases generados por el horno Hoffman en el que permitió conocer los parámetros de sus gases respectivos teniendo en cuenta las temperaturas para realizar el diseño de los ductos. Este diseño permite una reducción de tiempo en el proceso de secado y busca aumentar la producción de este, reutilizando el calor residual para llevarlo a cámaras de secado permitiendo agilizar el proceso y hacerlo más eficiente ahorrando combustible y disminuyendo la contaminación atmosférica.

El método de investigación utilizado fue el experimental descriptivo, en el que se realizaron diferentes pruebas para determinar las condiciones respectivas como lo son en este caso los gases de salida y comportamiento del material.

**Planta demostrativa de coquización con utilización de la energía de los gases y mínima contaminación** [5]. En este estudio los autores construyeron una planta demostrativa de producción de coque donde se utilizó la energía de gases de coquización para la cocción de ladrillo, con el fin de mostrar a los productores de coque la tecnología apropiada para generar menos contaminantes desde las plantas productoras de coque con hornos tipo colmena. Se implementaron ductos primarios y principales que consisten en que el ducto principal recoge los

gases provenientes de los hornos a través de los ductos primarios donde se produce una postcombustión de los gases de combustión del carbón; los resultados obtenidos mostraron que los ductos construidos cumplen satisfactoriamente la postcombustión de los gases de coquización reduciendo la emisión de humos.

En la utilización de la energía de los gases se concluyó que la combustión de los gases es casi completa y que los ductos donde se realiza este proceso se mantienen limpios.

**Investigación de la operación del horno de coque con recuperación de calor y sin recuperación utilizando un modelo unidimensional** [6]. En este proyecto tiene como propósito predecir el comportamiento en hornos de coque de recuperación de calor (HR) y de no recuperación (NR), se utilizó un modelo matemático unidimensional para predecir las temperaturas, presión, salidas de humos del horno y composición o comportamiento del gas dentro del mismo. Estos hornos son respetuosos con el medio ambiente a comparación de otros hornos convencionales, las emisiones de sustancias nocivas aparecen en estos sistemas cuando la presión es negativa. Como resultado, los contaminantes no se pueden emitir a los alrededores a través de fugas y aberturas existentes, tampoco se liberan a la atmosfera con gases de combustión porque el gas se oxida directamente en el horno. El coque producido es generalmente de mayor calidad.

**Comparison analysis of pollutant emissions factor for Lantan combustion instead of raw coal (Análisis comparativo del factor de emisión de contaminantes para la combustión de semicoque en lugar de carbón crudo)** [7]. En este trabajo los investigadores dedujeron que, con las impurezas volátiles de azufre, nitrógeno, entre otros contaminantes que se han liberado en la atmosfera con el proceso de retorta de carbón bituminoso se puede obtener Lantan (semicoque) de alta calidad. Para determinar la viabilidad del proyecto se experimentó con diferentes tipos de

carbón para evaluar la combustión como combustible limpio en lugar del carbón crudo, los carbones que se utilizaron fueron tratados en diferentes áreas para quemar y probar el principal factor de emisión de contaminantes; los resultados que obtuvieron determinaron que las emisiones de PM 2.5 de Lantan son aproximadamente el 3.23% del carbón, las emisiones de SO<sub>2</sub> se reducen en un 60%, las emisiones de HAP se reducen en más del 97%, que es lo más dañino para el cuerpo. Quemar Lantan tiene un efecto significativo para reducir la neblina si se usa como combustible civil en lugar de carbón crudo.

**Combustion performance of semi-coke from Inner Mongolia lignite under mild pyrolysis conditions. (Rendimiento de la combustión del semicoque de lignito de Mongolia, interior en condiciones de pirólisis moderada)** [8]. Esta investigación estudió la utilización eficiente y limpia del semicoque de lignito y la identificación de su rendimiento de combustión con hornos verticales de pirólisis de carbón, y tipo de calentamiento externo que se simulan en la producción industrial, los investigadores utilizaron un dispositivo experimental de pirólisis de carbón para hacer el mismo proceso al lignito. El análisis termogravimétrico se utilizó para estudiar el rendimiento de la combustión de semicoque/carbón donde se discutió los principales factores que afectan el rendimiento de la combustión del semicoque de pirólisis de lignito, y se compararon los rendimientos de la combustión de semicoque y carbón.

Los resultados obtenidos por los investigadores mostraron que la condición de pirólisis es un factor importante que afecta el rendimiento de la combustión del semicoque, con el aumento de la temperatura de pirólisis y la extensión del tiempo de pirólisis, el rendimiento de la combustión del semicoque de pirólisis del lignito de Mongolia (Interior) empeora; los parámetros de calidad están relacionados, y el rendimiento de la combustión del semicoque se puede predecir con precisión de la relación de combustible del semicoque.



Se compararon los valores obtenidos del rendimiento de la combustión del semicoque y el carbón, y se encontró que el rendimiento de la combustión del semicoque de pirolisis del lignito de Mongolia (Interior) es "anormal", la razón principal es que el coque tiene una estructura de poros bien desarrollada y alta actividad de carbono, sus propiedades son similares al carbón y tienen excelentes propiedades de combustión.

## **2.2 Marco Teórico**

El marco teórico constituye los aspectos técnicos requeridos y que sirvieron para orientar y conceptualizar el desarrollo de este proyecto de investigación, como lo es la obtención de semicoque.

**2.2.1 Semicoque.** El semicoque es un producto derivado del carbón con baja volatilidad, poca emisión de ceniza, y no daña la salud de la población; la calidad de este producto es alta y se distingue por quemarse sin humo por esa razón es utilizado primordialmente para la calefacción doméstica [9].

El semicoque se obtiene por medio de la carbonización del carbón a temperaturas bajas, que van entre 550 y 650 °C; es recomendable que la temperatura no pase de los 700°C ya que esto provocaría cambios en sus propiedades. Este producto presenta un atractivo ya que por lo general es más suave y blando que el coque [10]. La tabla 1 muestra las diferencias que se deben tener en cuenta entre el coque y el semicoque.

Tabla 1.

*Diferencias generales entre el coque y semicoque. Tomado de la referencia [10].*

Parámetro	Coque	Semicoque
Color	Tiene un color gris negruzco con brillo metálico.	Su color es negro claro.
Características relevantes	Alto poder calorífico, por su porosidad no puede ser compacto, tiene resistencia metálica la cual permite brindar un soporte con otras masas de sulfuros y fundentes.	Alta resistencia específica, alta actividad química, bajo contenido de cenizas, bajo azufre y bajo fósforo.
Aplicación en la industria	Aplicado en la industria de la fundición de aluminio, acero y otros metales.	Aplicado ampliamente a industrias químicas, metalúrgicas, y de fabricación de gas.
Utilización	Es utilizado para la preparación del gas productor que es una mezcla de monóxido de carbono (CO) y nitrógeno (N <sub>2</sub> ). Funciona como combustible y como agente reductor en la fundición de mineral de hierro en un alto horno.	Se utiliza para producir carburo de calcio, ferroaleaciones, ferrosilicio, carburo de silicio, silicomanganeso, fertilizantes.
Usos	El coque proporciona calor a los requerimientos endotérmicos de las reacciones químicas, y para la fusión de la escoria y del metal. Como reductor que produce y regenera los gases para la reducción de los óxidos de hierro.	El polvo de semicoque se puede usar en altos hornos en lugar de la inyección de coque en la fabricación de acero.

El semicoque tiene múltiples ventajas donde cabe mencionar el costo de producción, ya que la producción de este es más económica que el coque, también cuenta con buena permeabilidad al aire con una eficiencia mejorada; si se requiere reemplazar el carbón vegetal y coque por semicoque no es necesario cambiar equipos a los conocidos porque su operación es de fácil manejo. También puede ser utilizado para generar energía eléctrica de forma económica usando el proceso de combustión [11].

**2.2.2 Producción de semicoque.** Para la producción del semicoque es importante tener en cuenta la temperatura a la que se va a obtener, ya que cada medición ayuda a la obtención de propiedades específicas, el siguiente enunciado explica sobre las respectivas temperaturas y propiedades que tendrán:

- $T < a 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ : Predomina la eliminación de agua, óxidos de carbono y sulfuro de hidrógeno, como resultado de la descomposición térmica de los grupos térmicamente inestables.
- $T > de 200 a 300\text{ }^{\circ}\text{C}$ : Comienza la isomerización del carbono, evidenciada por las pequeñas cantidades de alquibencenos.
- $T entre 300 - 500\text{ }^{\circ}\text{C}$ : Comienza la descomposición térmica activa del carbón, caracterizada por el incremento en la pérdida de peso, debido a que se elimina aproximadamente el 75% de la materia volátil.
- $T entre 450-500\text{ }^{\circ}\text{C}$ : Se presenta la máxima evolución de material alquitranoso, hidrocarburos y gases combustibles, mientras el sulfuro de hidrógeno es eliminado entre 250-500  $^{\circ}\text{C}$ .
- $T > 500\text{ }^{\circ}\text{C}$ : Se elimina el amoníaco.
- $T \cong 550\text{ }^{\circ}\text{C}$ : Se completan los cambios.

- $T < 700$  °C: El semicoque mantiene sus propiedades viscoelásticas.
- $T > 700$  hasta  $1000$  °C: Se transforma en coque [12].

El proceso de producción varía dependiendo si el calentamiento es interno o externo. En las características de calentamiento interno se habla de que el portador de calor se acopla directamente con el producto haciendo que tenga mayor eficiencia a elevadas temperaturas, igual que su intensidad. El calentamiento externo no está en contacto directo con el producto si no que se transfiere a través de paredes que pueden ser de acero y elementos refractarios. Este tipo de calefacción presenta diferentes inconvenientes: baja eficiencia térmica, baja capacidad de procesamiento. Se debe tener en cuenta que aplicando este proceso también se tienen algunas ventajas, ya que no se mezclan con el portador posee alto valor calorífico y, la condensación de alquitrán es fácil de manejar con una alta viscosidad de carbón [13].

**2.2.3 Tipos de hornos.** Existen diferentes tipos de hornos para la producción de semicoque, entre esos se encuentran:

- Horno continuo Lambiotte.
- Horno de retorta.
- Tecnología Lurgi.

El proceso térmico externo incluye principalmente horno Crurber-Lurgi, horno Coolit, horno de retorta de lecho de carbón delgado; algunos hornos utilizados para la fabricación de semicoque son: Horno Lurgi, horno rectangular de gas, horno de retorta de pila y horno de retorta de colector, dichos hornos son utilizados principalmente en China, quien es uno de los mayores productores de semicoque.

- **Hornos de retorta:** Estos hornos son herméticos al gas, dependiendo su temperatura varían el calentamiento directo o indirecto. Principalmente se utilizan para tratamientos térmicos y tratamientos térmicos al vacío hasta a 600°C. Con una seguridad apropiada, estos hornos pueden ser operados en aplicaciones bajo gases reactivos, también son ideales para procesos de desaglomerado inerte o procesos de pirolisis [14].



*Figura 3.* Horno de retorta. Tomado de [14].

- **Horno continuo Lambiotte:** Es un horno vertical donde se produce carbón a partir de madera en breves lapsos de tiempo, puede aprovechar gases y condensables. Este horno trabaja con los gases que se transmiten a través de un gas neutro [15].  
Este horno presenta diferentes ventajas como lo son: Una producción en continuo de carbón vegetal frío, una muy elevada productividad de la mano de obra, un rendimiento máximo en carbón vegetal, una calidad regular y adaptable, la posibilidad de recuperar energía subproductos de la madera. Para su utilización lo que lo vuelve útil es que en este se puede utilizar cualquier tipo de madera sin importar su calidad, pero es recomendable trabajar con una sola variable a la vez, pero mientras más seca sea mayor es su productividad.  
Este horno debe ser vigilado continuamente por personal autorizado debido a que es importante la preparación de la madera y el acondicionamiento del carbón [18].

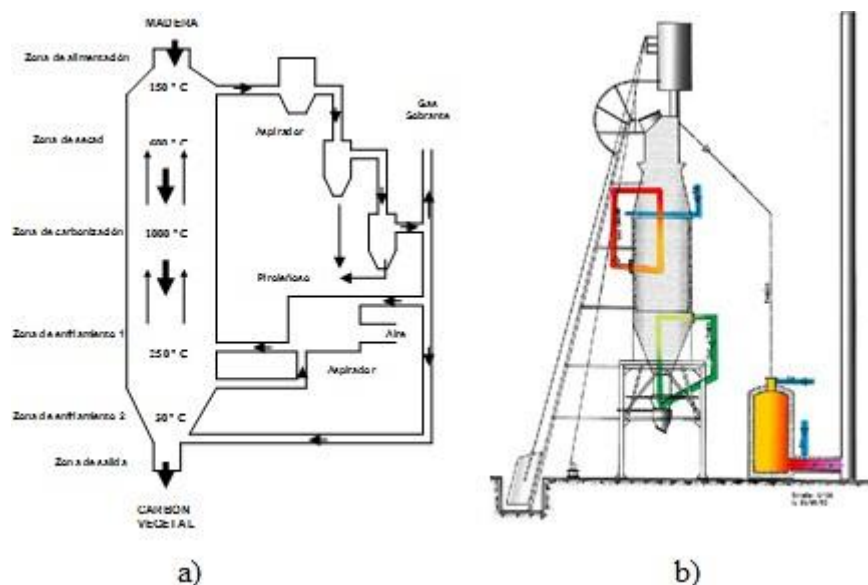


Figura 4. Representación gráfica de los hornos continuos Lambiotte a) Funcionamiento interno. b) Diagrama esquemático. Tomado de [18].

- Tecnología Lurgi:** Las materias primas utilizadas en esta tecnología son residuos de la refinación de petróleo como asfalto, bitumen, alquitrán, residuos de los reductores de viscosidad, residuos de los hidrocraqueadores, residuos FCC, residuos de vacío, alquitrán de hulla, alquitrán de arena petrolífera, etc. [19]. La tecnología Lurgi consiste en usar el reformado autotérmico para producir gas de síntesis usando como alimentación el gas natural o hidrocarburos ligeros. Opcionalmente la alimentación es desulfurizada y prereformado con vapor obteniendo gas de síntesis en condiciones alrededor de 40 bar, usando oxígeno como agente reformador. Las condiciones de reacción utilizadas en el proceso de baja presión de Lurgi son las siguientes: Temperatura (250-260°C), presión (725-1176 psig), catalizador (Cu + pequeñas cantidades de Zn + un componente el cual incrementara la resistencia de envejecimiento; también se usa óxido de zinc en reemplazo de zinc) [20].

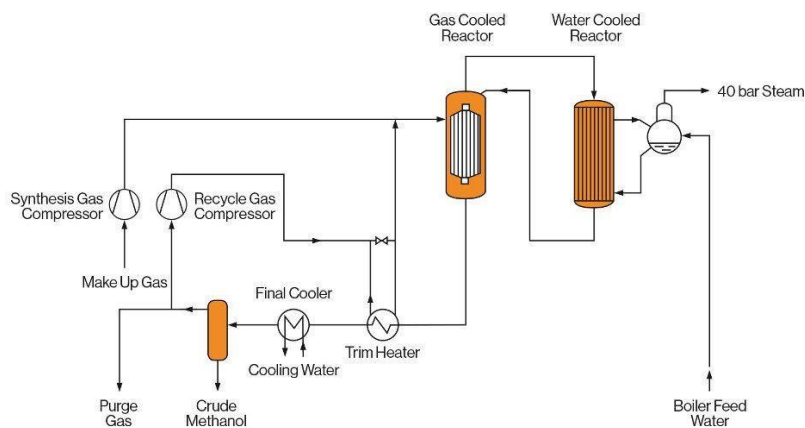


Figura 5. Unidad de síntesis del metanol. Tomado de [17].

**2.2.4 Mercado.** India y China se encuentran entre los principales países de mayor importación de coque y semicoque en el mundo. Los principales países socios son Polonia (172.26 millones de dólares), China (99.7 millones de dólares), Federación de Rusia (73.77 millones de dólares), Japón (57.78 millones de dólares), Colombia (49.81 millones de dólares). El valor total de importación se situó en 719.009 millones de dólares, mientras que el valor de importación promedio creció un 140,49% entre 2014 y 2018 [21].

Los costos del semicoque varían dependiendo su empresa, producción, tamaño, peso, oferta y demanda del mercado. Aquí se muestran algunos tipos de semicoque con su respectivo precio en (US) dependiendo la cantidad de toneladas que se venden.

- Semicoque de 30-80 mm como coque de tipo coque metalúrgico para las industrias de acero y ferroaleaciones \$360,00 - \$420,00/ Toneladas (40 Ton/ Toneladas)
- Semicoque para alto horno: \$140,00 - \$160,00/ Toneladas (20 Ton/ Toneladas)
- Semicoque de 10-30 mm, carbón de 83% \$ 170,00 - \$ 250,00 / Toneladas (20 Ton/ Toneladas)

- Semicoque de 5-15mm, 10-30mm \$ 260,00 - \$ 295,00 / Toneladas métricas (100 toneladas métricas / toneladas métricas)
- Semicoque (lam coke) 25-80mm, puede reemplazar met coke \$ 198,00 - \$ 202,00 / Toneladas (54 Ton / Toneladas)
- Semicoque 10-25mm \$ 180,00 - \$ 240,00 / Toneladas (40 Ton / Toneladas)
- Semicoque 30-80 mm de alto contenido de carbono Fc85% Min \$ 100,00 - \$ 200,00 / Toneladas (22 Ton / Toneladas) [21].

**2.2.5 Composición del carbón, coque y semicoque.** Los componentes fundamentales del carbón son conocidos como macérales que se derivan de diferentes partes del material vegetal original, el grupo vitrinita son los derivados del tejido leñoso de las plantas compuestas de polímeros, celulosa y lignina; y el grupo liptinita son de partes cerosas y resinosas de plantas, estos se muestran como poros, cutículas y resinas, son sensibles a la carbonización avanzada y generalmente desaparece de carbones bituminosos de rango medio a bajo volátil [22].

El carbón posee diferentes clases, cuyas propiedades de encontrarán en la tabla 2.

*Tabla 2.*

*Presenta las propiedades de las diferentes clases del carbón. Tomado de [22]*

Tipo de carbón	Porcentaje en peso de carbono	Porcentaje en peso de materia volátil (libre de materia mineral seca)	Reflectancia vitrinita	Porcentaje en peso de agua	Valor calorífico MJ/kg (sin agua ni materia mineral)
Turba		>50	–	>75	
Lignito	50–55	52	0.3–0.36	55–75	12–14.7



	55–60	47	0.36–0.42	35–55	14.7–16.3
Subituminoso	60–65	42	0.42–0.45	30	19.3–22.1
	65–70	39	0.45–0.48	25	22.1–24.4
	70–75	37	0.48–0.50	15	24.4–26.8
	75–80	33	0.50–1.12		26.8–34.0
Bituminoso	80–82.5	26	1.12–1.51		
	82.5–85	18	1.51–1.92		
	87	11	1.92–2.50		
Antracita	90	5	>2.50		
	92.5		–		

**2.2.6.1 Composición del coque.** Contiene alrededor de 68% a 95% de Carbono, Nitrógeno, Oxígeno, Azufre e Hidrogeno y casi el 5% restante es de ceniza, también cuenta con una humedad residual del 0.03%, el contenido de humedad varía según el sistema de apagado y propiedades físicas del coque; cuenta con material volátil de 3.92%. Las cenizas pueden estar compuestas por calcio, metales u otros elementos, las cenizas son sustancias contaminantes. La materia volátil está compuesta por diferentes contaminantes que intervienen de manera directa en la estructura del coque [23].

**2.2.6.2 Composición de semicoque.** El contenido de humedad del semicoque es de 28% hasta 35% recién salido del horno, debido al proceso de apagado y enfriado [24]. Posee menor contenido de ceniza, menor azufre y mayor contenido de carbono, su valor calorífico es elevado y es adecuado para el proceso de inyección de carbón pulverizado. En siguiente tabla se muestran algunas propiedades o componentes del semicoque [25].

Tabla 3.

*Propiedades o componentes del semicoque. Tomado de [25].*

Propiedades	Semicoque
Humedad %	7.56
Ceniza %	9.02
Materia volátil %	10.10
Carbono fijo%	80.16
C%	81.50
H%	3.5
N%	1.25
S%	0.34

### **3. Metodología**

Para el desarrollo del proyecto de investigación, se mostrará un listado de actividades para evidenciar cómo fue alcanzado cada uno de los objetivos específicos propuestos anteriormente, explicando con detalle cada actividad que se realizó para su cumplimiento.

#### **3.1 Precios y consumo mundial de coque y semicoque.**

Principalmente se buscaron algunas bases de datos que pudieran brindar una información clara acerca de los precios y el consumo mundial que tiene el coque y semicoque, debido a que esta materia prima es fundamental tanto para la exportación como para la importación.

#### **3.2 Caracterización de humos.**

La caracterización de humos se realizó por el análisis del resultado de muestreo isocinético de gases hecho por Comnambiente para una empresa de la región, este análisis permite determinar la energía disponible en los gases y determinar la cantidad de semicoque que se podría producir teniendo en cuenta la temperatura óptima de semicoquización.

La planta analizada trabaja con hornos colmena, que son los más utilizados en la región. Se considera el comportamiento de este, es decir, evaluando los estándares de emisión aplicados en esta industria de carbón; también se investigó el comportamiento de los humos en el proceso respecto a la temperatura con ayuda de una mufla que fue la utilizada en este análisis. La caracterización de humos permite determinar los gases específicos que pueden ser utilizados para la obtención de semicoque teniendo en cuenta su temperatura.

Para la ejecución de este objetivo, primero se plantearon las temperaturas a trabajar según la literatura (700, 650, 600°C) a las que se obtiene semicoque, luego se trabajó con dos rampas de sostenimiento a media ½ y (1) hora.

### 3.3 Diseño de elementos o herramientas para ensayos de laboratorio.

Como primer paso, se construyó una caja de acero al carbono semihérmica de (14 \* 19 \* 9,5) cm<sup>3</sup> para colocar las muestras de carbón dentro de una mufla. La mufla con la que se trabajó es marca Terrígeno modelo D8 y trabaja a 2600W a 220V. Otra herramienta también utilizada fue una pistola infrarroja para medir la temperatura del carbón, esta iba conectada a una termocupla tipo k de 20 cm de largo.

En la tabla 4 se muestran las propiedades del carbón utilizado para los ensayos, este carbón fue donado por una empresa local y por esa misma razón se tienen las siguientes propiedades.

Tabla 4.

*Propiedades del carbón para ensayo.*

%HT	%Czdry	%MV	%CF	FSI
3.34	7.55	37.55	54.9	7.5

- %HT (Humedad total): Representa la cantidad de agua que se encuentra sobre la superficie de las partículas de carbón.
- %Czdry (Análisis de ceniza en base seca): La calidad del carbón se da respecto a la combustión del proceso, es decir, mayor contenido de ceniza, menor poder calorífico se presentará en el carbón bruto.
- %MV (Materia volátil): Es el carbón que se desprende en el proceso de combustión, este proceso muestra diferentes propiedades de este.
- %CF (Carbono fijo): Se utiliza para determinar la cantidad de productos de combustión intermedios que se producen en el proceso.

- FSI (Índice de hinchamiento del carbón): Indica cómo se comporta el carbón cuando es calentado en el proceso. [23]

Es fundamental realizar este análisis ya que con el desarrollo del mismo se logra determinar la reacción específica del producto en cada temperatura.

Procedimiento: Se depositan 800 gr de carbón en un recipiente cerrado de lámina de acero al carbono 1060, con solo un agujero de 1.2 cm de diámetro para la salida de los gases producidos, luego se coloca dentro de la mufla previamente programada con tiempo y temperatura de acuerdo al proceso que se quiera investigar, cuando el proceso finaliza la muestra se deja enfriar para proceder a pesarla nuevamente y analizar los cambios obtenidos. Como dispositivos de medición de la temperatura se utilizó una termocupla tipo k acoplada a una pistola infrarroja para las lecturas de las diferentes temperaturas.

### **3.4 Análisis de ensayo de laboratorio.**

Para la realización de las pruebas, primero se pesó el carbón para luego proceder a depositarlo en la caja metálica y ser colocada en la mufla, ahí se tomó la temperatura interna del producto con una termocupla tipo k; la medición obtenida fue comparada con la temperatura indicada por el sensor de la mufla, este procedimiento se realizó con el fin de observar el tiempo que demora la muestra en llegar a la temperatura de la mufla.

Se realizó esta serie de pasos con el fin de determinar una temperatura ideal para la obtención de semicoque, se realizaron pruebas desde 450°C hasta 700°C cada una efectuada para tiempos de calentamiento en la mufla de una (1) y dos (2) horas, y rampas de sostenimiento de temperatura de media (½) y una (1) hora, para alcanzar la misma temperatura de la mufla.

### **3.5 Validación de métodos experimentales utilizados.**

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en las pruebas de laboratorio y seleccionando las muestras que presentan mejores efectos, se procede a evaluar cuáles fueron las temperaturas ideales para la obtención de semicoque determinando la salida de gases en el proceso.

Para la realización de esta prueba se utilizó el método de investigación experimental ya que este permite tener una mejor visión brindando la facilidad de modificar las variables utilizadas, en este caso temperatura y tiempo. Anteriormente se explicó la realización de las pruebas, pero como se mencionó las de mejor resultado fueron las ejecutadas en segunda rampa, estas son a media ( $\frac{1}{2}$ ) y una (1) hora donde la temperatura se mantenía.

### **3.6 Diseño de la cámara para producción de semicoque.**

Para determinar el diseño de la cámara para producción de semicoque, primero se realizó una búsqueda en diferentes literaturas para tener una mejor idea del modelo que se quería plasmar, teniendo en cuenta diferentes factores como lo son la efectividad, facilidad de implementación y utilización de hornos.

Con base en la estructura de las diferentes plantas de coquización existentes en la región y el diseño de sistema de salida de gases, se procedió a plantear las modificaciones a los ductos de salida de humos para la colocación de las bandejas que contendrán el carbón para la transformación a semicoque, esto gracias al uso del software especializado SolidWorks.

## 4. Resultados

En esta sección se presentan los resultados obtenidos en el proyecto.

### 4.1 Caracterización de humos.

Trabajando con los resultados de los análisis hechos por la empresa COMNAMBIENTE para una empresa coquizadora de la región, se analizó la información sobre las características del flujo de los humos, obteniéndose los gases presentes como oxígeno, dióxido de carbono, monóxido de carbono y nitrógeno. En adición a esto, se tienen los gases trazas componentes de la materia volátil, como son el material particulado (MP), dióxido de azufre ( $SO_2$ ), hidrocarburos totales (HCT) y policlorobenceno-p-dioxinas y policlorodibenzofuranos (D&F), los resultados arrojados fueron los siguientes:

- Material particulado ( $43,52 \text{ mg/m}^3$ )
- Dióxido de azufre ( $SO_2$ ) ( $465,78 \text{ mg/m}^3$ )
- Hidrocarburos totales (HCT) ( $4,63 \text{ mg/m}^3$ )

El proceso de coquización se conforma de diferentes fases, las cuales el carbón cambia su forma, color, y textura; en esas mismas fases los humos de salida varían expulsando diferentes tipos de gases que en su mayoría no son buenos para el medio ambiente. Como se trabajará preferiblemente con hornos colmena se consideró el comportamiento de este, es decir, evaluando los estándares de emisión aplicados en esta industria de carbón.

En la siguiente tabla se explicará tipos de gases de salida y cambios en el material.

Tabla 5.

*Gases producidos de acuerdo con la temperatura. Adaptado de: [24]*

Temperatura	Característica
A 105°C	Comienza el desprendimiento de agua del proceso.
Cerca a los 200°C	Los hidrocarburos parafínicos comienzan a desprenderse en pocas cantidades.
Alrededor de los 360°C	A esta temperatura inicia la fusión de la pasta.
A los 410°C	Termina el proceso de reblandecimiento para continuar con el hinchamiento de la masa.
Continuando a 450°C.	El proceso de hinchamiento se prologa para continuar con la desgasificación primaria.
Cerca a los 650°C	A esta temperatura la materia prima ya ha tenido mayor pérdida de peso.
Por los 700°C	Continúa con una segunda desgasificación donde se desprende hidrógeno, monóxido de carbono y etileno.
Finalmente, a 950°C	Obtención de coque.

De acuerdo con la tabla 5. Se observa que a temperatura mínima la cantidad de gases es poca pues empieza la fase de desprendimiento. Para el proceso de hinchamiento es ideal que el carbón logre llegar a la temperatura de los 410°C; el hinchamiento sucede cuando la materia prima expande su forma perdiendo considerablemente su peso, esta pérdida se da a los 650°C.

Las diferentes etapas en la transformación del carbón a semicoque y luego a coque se producen desprendimientos de volátiles de acuerdo con la temperatura. Según la siguiente escala:

- 400°C -  $H_2S$  (Ácido sulfhídrico)
- 550°C -  $C_2H_6$  (Etano)
- 725°C -  $C_2H_4$  (Etileno)
- 700°C -  $CH_4$  (Metano)
- 800°C -  $H_2$  (Hidrogeno)
- 950°C - Total de gases



En la figura 6 se muestra lo mencionado anteriormente.

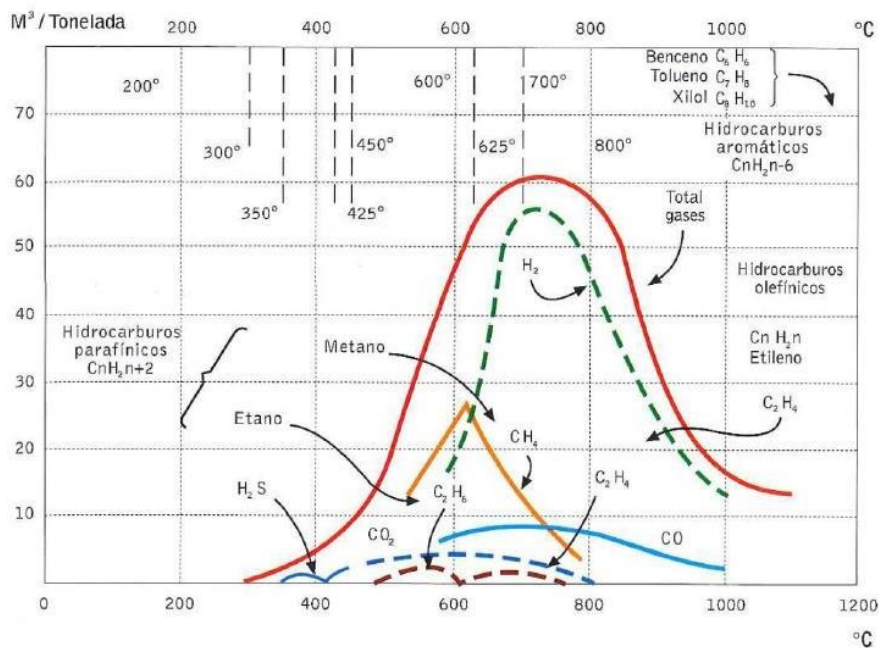


Figura 6. Desprendimiento de volátiles. Tomado de [24]

La unión de dos etapas de desprendimiento se denomina como hidrocarburos parafínicos ( $C_nH_{2n+2}$ ) que está compuesta por metano ( $CH_4$ ) y etano ( $C_2H_6$ ) [24]. En la realización de las pruebas se encontró que estos gases aumentan su cantidad conforme a la temperatura, la mayor magnitud de humo se da entre los 430 a 520°C. Realizando un respectivo análisis del proceso de cada prueba, se muestra en la tabla 5 el comportamiento del humo respecto a la temperatura.

Tabla 6.

*Descripción del comportamiento de los humos respecto a la temperatura en los ensayos realizados en el laboratorio (por observación).*

Temperatura	Comportamiento del Humo
300 – 370°C	Primeros humos.
370 – 390°C	El humo de salida cambia su color a azul.
390 – 400°C	Mayor cantidad de humo.
400 – 435°C	Humo color blanco.
435 – 480°C	Aumenta la cantidad de humo.
480 – 509°C	Humo color marrón.

509 – 520°C	Salida de aceite y aumenta la cantidad de humo.
520 – 569°C	Se reduce la salida de humo.
569 – 600 – 700°C	El humo se reduce y al llegar a los 700°C pero al pasar los minutos es notorio observar que estos siguen apareciendo en menor cantidad.


---

La temperatura máxima con que se trabajó fue de 700°C y como se mencionó anteriormente los humos continúan saliendo, esto se debe a que la temperatura interna del carbón no alcanza a elevarse hasta donde se espera. Se determinó realizar nuevas pruebas a diferentes rampas (1 hora en elevar su temperatura y 1 hora en mantenerse en rampa de sostenimiento, otra rampa fue ½ hora en mantenerse en la misma). Con los resultados obtenidos se determinó que en las temperaturas de (600, 650 y 700°C) fueron las únicas en terminar el proceso, es decir que los humos se reduzcan hasta disminuirse en gran magnitud. En las siguientes tablas se mostrará el comportamiento de los humos al llegar a la temperatura establecida cumpliendo el tiempo requerido.

**Prueba 1.** 1h y 1h T: 600°C (Esta prueba inicio a las 9:44 AM)

Tabla 7.

*Comportamiento de la materia volátil con rampa de sostenimiento a 1 hora a temperatura de 600°C*

Tiempo	Características	Imagen
10:44 AM	A esta hora llego a la temperatura establecida y el color de humo marrón a gran cantidad.	

10:57 AM Humo marrón y redujo la cantidad.



11:07 AM Redujo la cantidad.



11:18 AM El color continúa siendo marrón, pero se ven partes blancas y sigue reduciendo la cantidad.



11:23 AM Color de humo blanco.



11:26 AM Color de humo azul y cantidad mínima.





11.31 AM Reducción de la generación de humo.



**Prueba 2.** 1h y 1h T: 650°C (Esta prueba inicio a las 9:07 AM)

Tabla 8.

*Comportamiento de la materia volátil con rampa de sostenimiento a 1 hora a temperatura de 650°C*

Tiempo	Características	Imagen
10:07 AM	A esta hora alcanzó la temperatura establecida y el color de humo marrón a gran cantidad.	
10:20 AM	Humo marrón y gran cantidad.	

10:29 AM Redujo la cantidad, pero conserva el mismo color.



10:41 AM Se reduce significativamente los humos.





---

**Prueba 3.** 1h y ½ h T: 650°C (Esta prueba inicio a las 9:11 AM)

Tabla 9.

*Comportamiento de la materia volátil con rampa de sostenimiento a ½ hora a temperatura de 650°C*

Tiempo	Características	Imagen
10:11 AM	A esta hora llego a la temperatura establecida y el color de humo marrón a gran cantidad.	

10:20 AM Humo marrón y gran cantidad.



10:31 AM Los gases se incendian.



10:36 AM El color cambia a blanco y marrón.



10:38 AM Reduce la cantidad y presenta color azul.



10:42 AM



Se reducen significativamente los humos.



**Prueba 4.** 1h y 1h T: 700°C (Esta prueba inicio a las 9:03 AM)

Tabla 10.

*Comportamiento de la materia volátil con rampa de sostenimiento a 1 hora a temperatura de 700°C*

Tiempo	Características	Imagen
10:03 AM	A esta hora alcanzó la temperatura establecida y el color de humo marrón y con parches negros a gran cantidad.	
10:18 AM	Humo marrón y redujo la cantidad.	



10:31 AM      Se reducen los gases.



10:40 AM      El color cambia y se reduce la cantidad de humo.



10:48 AM      Se reduce significativamente los humos.







---

**Prueba 5.** 1h y ½ h T: 700°C (Esta prueba inicio a las 9:37 AM)

Tabla 11.

*Comportamiento de la materia volátil con rampa de sostenimiento a ½ hora a temperatura de 700°C*



Tiempo	Características	Imagen
10:37 AM	A esta hora llego a la temperatura establecida y el color de humo marrón a gran cantidad.	
10:48 AM	Humo marrón y redujo la cantidad.	
10:58 AM	Los gases se redujeron a mayor cantidad.	
11:00 AM	El color de humo cambia a blanco y se reduce la cantidad.	

11:03 AM

El color de humo cambia a azul.



11:10 AM

Se reducen significativamente los humos



Respecto a las tablas 7, 8, 9, 10 y 11 se encontró según lo observado que los resultados no varían de una temperatura a otra, pues la producción del humo actúa de forma similar y al llegar a la segunda rampa de sostenimiento de la temperatura, los gases dejan de aparecer cuando el carbón iguala su temperatura con la del horno. La implementación de este segundo cambio fue satisfactoria debido a que se cumple con la elaboración de semicoque.

#### 4.2 Diseño de elementos o herramientas para ensayos de laboratorio.

Las siguientes figuras muestran las herramientas utilizadas y mencionadas anteriormente en la sección 3.3 de este documento.



a.

b.

c.

Figura 7. Caja utilizada para el análisis del carbón en la mufla. *a. Vista Frontal b. Vista exterior.*

*c. Vista interior*



Figura 8. Horno o mufla utilizada. *a. Vista frontal. b. Vista exterior*



Figura 9. Termocupla Tipo k

Figura 10. Multímetro

Figura 11. Pistola infrarroja

#### 4.3 Análisis de ensayo de laboratorio.

Estas pruebas fueron elaboradas desde temperaturas de 450° a 700°C con el fin de determinar la temperatura y tiempo específico para la obtención de semicoque con la mayor eliminación de la materia volátil.

En la tabla 12 se explica lo observado en las muestras de semicoque obtenidas a las temperaturas mencionadas anteriormente, luego se hará una evaluación de las muestras teniendo en cuenta los resultados obtenidos en los análisis del laboratorio hechos por la empresa Las muestras analizadas fueron de 500 a 700°C aplicadas a dos rampas de sostenimiento de una (1) hora y ½ hora. En primera instancia en las tablas 12 y 13 se mostrará el resultado de las muestras sin rampa de sostenimiento, esto con el fin de analizar de manera más amplia las pruebas.

Tabla 12.

*Resultados de muestras de carbón en 2 horas sin rampa de sostenimiento.*

Prueba	Imagen	Análisis
Prueba 1 (450°C a 2 horas sin rampa)		Las pruebas 1 y 2 son duras y no son frágiles como las demás muestras, esto es debido a que la temperatura es baja para el proceso y no alcanza a cumplir su ciclo.
Prueba 2 (500°C a 2 horas sin rampa)		En la figura se muestra lo mencionado anteriormente.
Prueba 3 (550°C a 2 horas sin rampa)		La muestra 3 es la única que su color varía, este fenómeno es por el aumento de temperatura, mientras la temperatura aumenta el color se modifica y cuando llega a los 700°C vuelve a su tonalidad inicial.

Prueba 4  
(600°C a 2  
horas sin  
rampa)



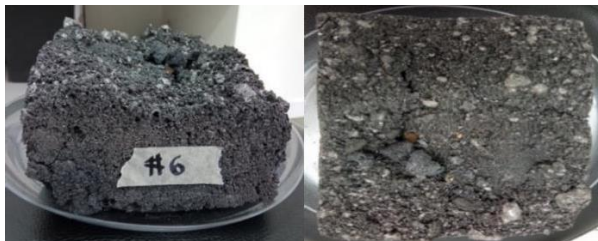
A comparación de las muestras 1 y 2 esta presenta menos dureza, el color es plateado en la superficie, paredes más porosas.

Prueba 5  
(650°C a 2  
horas sin  
rampa)



Altura inicial se redujo, en la superficie presenta una serie de burbujas que se tornan más pronunciadas a las otras muestras, color azul metalizado y paredes externas porosas.

Prueba 6  
(700°C a 2  
horas sin  
rampa)



Paredes externas con agujeros y porosas, en la superficie cuenta con burbujas de tamaño más grande a la anterior muestra, su altura no es uniforme.

#### ANÁLISIS DE PRUEBAS MOSTRADAS EN LA TABLA 12.

Analizando lo observado durante las pruebas anteriores se concluyó que no logra cumplir con los objetivos mencionados debido a que los resultados de las pruebas no varían significativamente una de otra, pues su textura y color es similar. Siguiendo el proceso anterior se continuó con otra prueba aplicada a la misma temperatura, pero en diferente tiempo (1 hora) este se redujo para determinar el comportamiento del carbón.

Tabla 13.

*Resultado de muestras de carbón en 1 hora sin rampa de sostenimiento.*



Prueba	Imagen	Análisis individual
Prueba 450°C a 1 hora sin rampa		<p>El tiempo aplicado a esta prueba no fue el predilecto debido a que no alcanza a terminar su ciclo. La textura de esta prueba no es compacta. Se puede observar que gran parte de su textura es en polvo, esto quiere decir que esta prueba resulta obsoleta.</p>
Prueba 500°C a 1 hora Sin rampa		<p>Las temperaturas bajas no son recomendables para este tipo de pruebas. Su textura es porosa, no es compacta y tiene partes hechas polvo.</p>
Prueba 550°C a 1 hora sin rampa		<p>El proceso de coquización empieza a verse en esta prueba, presenta un color azul oscuro, textura frágil con partes compactas.</p>
Prueba 600°C a 1 hora sin rampa		<p>A medida que la temperatura aumenta la prueba toma mejores cualidades, esta prueba presenta un textura más compacta y frágil.</p>

Prueba 650°C  
a 1 hora sin  
rampa



Presenta un color dorado y azul en la superficie, las burbujas son de diferentes tamaños.

---

Los datos obtenidos anteriormente demostraron que los resultados no fueron satisfactorios, por ende el ensayo de 700°C a una (1) hora no se realizó debido a que el carbón puede actuar de la misma manera que en las demás muestras, esta prueba fue aplicada sin rampa de sostenimiento debido a que también es importante analizar el comportamiento de la muestra con otro método.

#### **4.3.1 Análisis general de ensayo.**

Los resultados arrojados en el tiempo de una hora sin rampa de sostenimiento no fueron satisfactorios pues como la prueba anterior al finalizar el tiempo estipulado los gases volátiles aparecieron en mayor cantidad. Los gases volátiles o humos surgen a causa de que el carbón empieza a desprender humedad e hidrocarburos parafínicos, este proceso puede tardar entre una hora a hora y media en concluirse.

El tiempo ejecutado en este ensayo no fue preciso para el cumplimiento del objeto del proyecto. Los resultados arrojaron que las muestras no cumplieron su ciclo de reblandecimiento e hinchamiento de masa como se esperaba; los humos de salida en estas muestras siguen predominando al cumplir el tiempo en el horno.

Las muestras obtenidas en este ensayo muestran que en el tiempo de 1 hora no es suficiente para que estas tomen una forma compacta, pues como se puede observar en las pruebas de 450°C a 600°C su forma es granulada con partes en bloque, este fenómeno se da porque el carbon no iguala la temperatura del horno y su proceso queda interrumpido.

Al observar que no se obtuvieron buenos resultados, se decidió tomar pruebas en dos rampas de tiempo. La primera subiendo en una hora hasta la temperatura establecida y luego manteniéndose en este mismo tiempo a igual temperatura; después se realizó un segundo ensayo en dos rampas variando el tiempo a media hora manteniéndose a la temperatura establecida. Este ensayo presentó los resultados esperados para el proceso de semicoquización.

#### 4.3.2 Evaluación de resultados de las muestras analizadas en laboratorio Carbomax.

Se enviaron las muestras de 500, 550, 600, 650, y 700°C aplicado en una rampa de dos tiempos (1h y ½ h) y se evaluó el % de humedad, % ceniza, % materia volátil, carbono fijo, poder calorífico, ceniza, etc. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 14.

Tabla 14.

*Resultados muestras analizadas por empresa Carbomax.*

Temperatura y tiempo	% humedad	% Ceniza DRY	% Materia volátil	Carbono fijo	Poder calorífico DRY (btu/lb)	Ceniza AS
500 T4 t: 1h sube y 1h mantiene	3.30	10.12	14.16	75.72	12890	9.78
550 T3 t: 1h sube y 1h mantiene	3.96	10.71	11.54	77.74	12909	10.29
600 T1 t: 1h sube y 1h mantiene	4.32	11.66	8.15	80.19	12726	11.16
650 T2 t: 1h sube y ½ h mantiene	5.10	10.80	8.03	81.17	12925	10.25
650 T5 t: 1h sube y 1h mantiene	5.06	11.19	7.75	81.06	12849	10.62
700 T7 t: 1h sube y ½ h mantiene	5.35	11.32	6.35	82.32	12796	10.72
700 T6 t: 1h sube y 1h mantiene	5.30	11.93	6.29	81.78	12667	11.30



En la tabla 14 se muestran los resultados obtenidos en las pruebas, como se puede observar las muestras con menor porcentaje de materia volátil son las de 700°C aplicadas en rampas de sostenimiento de 1 y ½ hora, donde se concluyó que a mayor temperatura mejor es el resultado debido a que el carbon alcanza a igualar la temperatura con la mufla y termina su proceso, mientras que a menor temperatura no cumple con este proceso. Con respecto al porcentaje de humedad, cabe mencionar que como se mostró en la seccion 3.3, el porcentaje de humedad varía significativamente respecto a los resultados obtenidos en la tabla 14, esto es debido a que los análisis de laboratorio se hicieron varias semanas después de realizadas los ensayos en la mufla y las muestras no estaban almacenadas herméticamente.

Las figuras 12 hasta la 21, muestran el resultado del carbón con rampas de sostenimiento de una hora y ½ hora.

**4.3.2.1 PRUEBA DE 500°C en dos rampas de tiempo.** Una 1 hora para llegar a la temperatura establecida y una hora para continuar en la misma temperatura.



*Figura 12.* Muestra final a 500°C en rampa de sostenimiento de una hora.

**4.3.2.2 PRUEBA DE 550°C en 1 hora aumenta – 1 hora se mantiene.**



*Figura 13.* Muestra final a 550°C en rampa de sostenimiento de una hora.

**4.3.2.3 PRUEBA DE 600°C en 1 hora aumenta – 1 hora se mantiene.**



*Figura 14.* Muestra final a 600°C en rampa de sostenimiento de una hora.

**4.3.2.4 PRUEBA DE 650°C en 1 hora aumenta – 1 hora se mantiene**



*Figura 15.* Muestra final a 650°C en rampa de sostenimiento de una hora.

#### 4.3.2.5 PRUEBA DE 700°C en 1 hora aumenta – 1 hora se mantiene.



Figura 16. Muestra final a 700°C en rampa de sostenimiento de una hora.

### ANÁLISIS GENERAL DE LA PRUEBA

No se realizó la prueba de 450°C debido a que esta temperatura no es apta para la obtención de semicoque. En las muestras de las figuras 12 hasta la 16 se determinó que la masa disminuye de manera considerable, este fenómeno se presenta por la eliminación de la materia volátil y un ejemplo claro son las pruebas realizadas a 650°C y 700°C pues su tamaño disminuyó aún más a comparación de las demás muestras permitiendo facilidad de manipulación a la hora de extracción en la caja.

Las pruebas al pasar su primera rampa siguen presentando humos se salida, pero al continuar con la segunda rampa de sostenimiento la producción de gases disminuye considerablemente cuando el carbón alcanza la temperatura específica. Utilizando la termocupla tipo k y la pistola infrarroja, se midió la temperatura del carbón dentro de la mufla para determinar en qué momento alcanzaba la temperatura de la mufla.

Se realizó otra prueba que va desde 1 hora en llegar a la temperatura y media hora manteniéndose en la misma, esto para determinar si se logra tener buenos resultados en menor tiempo. En las siguientes imágenes se presenta el producto final de este proceso.



**4.3.3.1 PRUEBA DE 500°C 1 hora sube a temperatura y media hora se mantiene.**



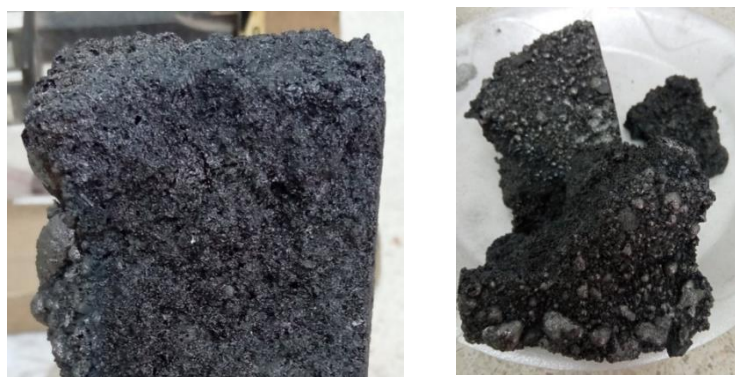
*Figura 17.* Muestra final a 500°C en rampa de sostenimiento de media hora.

**4.3.3.2 PRUEBA DE 550°C 1 hora sube a temperatura y media hora se mantiene.**



*Figura 18.* Muestra final a 550°C en rampa de sostenimiento de media hora.

**4.3.3.3 PRUEBA DE 600°C 1 hora sube a temperatura y media hora se mantiene.**



*Figura 19.* Muestra final a 600°C en rampa de sostenimiento de media hora.

#### **4.3.3.4 PRUEBA DE 650°C 1 hora sube a temperatura y media hora se mantiene.**



*Figura 20.* Muestra final a 650°C en rampa de sostenimiento de media hora.

#### **4.3.3.5 PRUEBA DE 700°C 1h sube a temperatura y media hora se mantiene.**



*Figura 21.* Muestra final a 700°C en rampa de sostenimiento de media hora.

Las muestras obtenidas en estas pruebas son satisfactorias a temperatura de 600, 650 y 700°C pues estas temperaturas son ideales para la obtención de semicoque, a pesar de que el tiempo de la segunda rampa de sostenimiento es menor también se comporta favorablemente debido a que la materia volátil disminuye.

Observando las muestras se determinó que las de más alta temperatura se contraen al enfriarse lo cual facilita la extracción; como el tiempo de producción fue menor a las anteriores pruebas estas se muestran grietas pronunciadas en el centro de la muestra, los gases dejan de salir en un intervalo de 20 a 30 min a temperaturas de 650 y 700°C luego que llega a la temperatura.

Las pruebas realizadas anteriormente definieron que antes de pasar a su segunda rampa los humos se comportan de la misma manera a las anteriores pruebas. En la siguiente tabla se muestra el comportamiento del humo a rampas de 1 hora y media hora.

### **PRIMER ENSAYO CON RAMPA**

#### **✓ 1 hora sube y 1 hora se mantiene.**

Tabla 15.

*Comportamiento de los humos al iniciar segunda rampa en el tiempo de 1 hora.*

Intervalo de tiempo	Comportamiento
1 hora - luego de alcanzar la temperatura ajustada.	Se siguen presentando humos porque no se iguala la temperatura interna con la externa.
1 hora y 13 min	Color marrón pero menor cantidad de humo.
1 hora y 23 min	Se reduce cantidad de humo, pero conserva mismo color.
1 hora y 34 min	Color marrón y blanco pero menor cantidad de humo.
1 hora y 36 min	Los humos se reducen en gran parte y presenta un color blanco.
1 hora y 42 min	Color azulado en menor cantidad.
1 hora y 49 min	Disminuyen humos significativamente.

#### **✓ 1h sube y media (1/2) h se mantiene.**

Tabla 16.

*Comportamiento de los humos al iniciar segunda rampa en el tiempo de media hora.*

Intervalo de tiempo	Comportamiento
1h - luego de llegar a la temperatura que se quiere.	Se siguen presentando humos porque no se iguala la temperatura interna con la externa.
1h y 14 min	Humo color marrón pero menor cantidad.
1h y 23 min	Humo color blanco y menor cantidad.
1h y 25 min	Humo color azul y menor cantidad.
1h y 30 min	Disminuyen humos significativamente.

Inicialmente se trabajó con la rampa de sostenimiento en 1 hora para determinar si en ese tiempo cumplía las expectativas del proceso, dado que sí se obtuvieron a temperaturas entre 600 a 700°C se tomó la decisión de reducir el tiempo a media hora. Estos resultados también fueron gratos a temperaturas de 650 y 700°C pues como se aprecia en la tabla 16 los gases disminuyen permitiendo una reducción del proceso. En las tablas siguientes se explicará el comportamiento a diferentes temperaturas teniendo en cuenta el tiempo de rampa.

Tabla 17.

*Comportamiento de materia volátil variando la temperatura y aplicando rampas de sostenimiento a 1 hora.*

Temperatura de la mufla	Tiempo de rampa	Tiempo de sostenimiento.	Conclusiones
500°C	1 HORA	1 HORA	Con esta muestra no se obtuvieron resultados satisfactorios debido a que su materia volátil aparece en gran cantidad, presenta dificultad de extracción y su textura es porosa y compacta.
550°C	1 HORA	1 HORA	La cantidad de materia volátil es elevada, este presenta un color blanco y aparece en mayor aumento, presenta dificultad de extracción.
600°C	1 HORA	1 HORA	La materia volátil se reduce, pero no lo suficiente porque se puede observar humos color azul.
650°C	1 HORA	1 HORA	Presenta menor materia volátil, fácil extracción, disminución de masa, color plateado.
700°C	1 HORA	1 HORA	Los resultados de esta muestra son satisfactorios debido a que su materia

volátil es menor a las temperaturas anteriores, es importante resaltar que el carbón iguala la temperatura de la mufla, fácil de extraer, pero compacta.

Tabla 18.

*Comportamiento de materia volátil variando la temperatura y aplicando rampas de sostenimiento a 1/2 hora.*

Temperatura de la mufla	Tiempo de rampa	Tiempo de sostenimiento.	Conclusiones
500°C	1 HORA	1/2 HORA	Presenta mayor cantidad de materia volátil, agrietamiento.
550°C	1 HORA	1/2 HORA	La materia volátil en esta temperatura no varía de la muestra de 550°C.
600°C	1 HORA	1/2 HORA	Aunque se redujo la materia volátil se siguen observando humos.
650°C	1 HORA	1/2 HORA	La materia volátil se redujo al llegar a la temperatura de 650°C pero los humos no desaparecieron hasta concluir el proceso con la segunda rampa.
700°C	1 HORA	1/2 HORA	Al llegar a la temperatura en la primera rampa un se observan humos color marrón, pero al llegar a la media hora los humos disminuyen significativamente.

Como se muestra en las tablas 17 y 18 las últimas temperaturas son favorables para los ensayos y por ende en la siguiente tabla se explicará cuáles son propicias para el proceso de semicoquización.



Tabla 19.

*Análisis de temperaturas favorables para este ensayo.*

Temperatura	Tiempo de rampa	Tiempo de sostenimiento.	Conclusiones
600°C	1 HORA	1 HORA	Al llegar a su temperatura se puede observar materia volátil, pero al pasar a la rampa de sostenimiento este se elimina, la muestra redujo su tamaño y presenta un centro poroso y endeble.
650°C	1 HORA	1 HORA	Materia volátil en menor cantidad, se puede mencionar que al pasar a la rampa de sostenimiento los humos se reducen. La muestra presenta fácil extracción, es compacta, su centro es macizo a comparación de la prueba de 600°C.
700°C	1 HORA	1 HORA	Esta muestra presenta resultado satisfactorio debido que al pasar a la rampa de sostenimiento la materia volátil se reduce en menos tiempo de la hora estimada. La muestra es compacta con fácil extracción, tiene grietas en la parte superior, paredes exteriores porosas.
650°C	1 HORA	1/2 HORA	Al llegar a la temperatura de 650°C los humos se redujeron en mayor cantidad, al pasar a la rampa de sostenimiento la materia volátil disminuye favorablemente. La muestra presenta grietas profundas en su centro, pero es compacta.
700°C	1 HORA	1/2 HORA	La materia volátil se redujo considerablemente al llegar a los 700°C estando en la primera rampa, al continuar el proceso con la rampa de sostenimiento la materia volátil disminuye. La muestra presenta fácil

extracción, su textura es porosa y su centro no es endeble.

#### 4.4 Validación de métodos experimentales utilizados.

En la realización de esta prueba se determinó que las temperaturas entre 600 a 700°C son más efectivas aplicadas en rampas de media hora a una hora adicional, ya que permite que el carbón alcance la temperatura establecida y desaparezcan gases o materia volátil.

Aplicando el análisis experimental se obtuvieron diferencias en comportamientos del carbón en la misma temperatura con rampa diferente. En la tabla 20 se presentan las diferencias mencionadas.

Tabla 20.

*Diferencias del carbón a diferente rampa de temperatura.*

Temperatura	Rampa de una hora	Rampa de media hora
500°C	<p>COLOR: Burbujas superiores plateadas, marrón y azul metalizado, tamaño de burbujas pequeñas y medianas.</p> <p>EXTRACCION: Difícil de extraer.</p> <p>PAREDES: Porosas y altura desigual.</p> <p>TEXTURA: Dura, aunque en el proceso aparecieron grietas en su centro.</p> <p>MATERIA VOLATIL: Luego de cumplirse el tiempo se presentó materia volátil.</p>	<p>COLOR: Burbujas superiores marrón y doradas, tamaño de burbujas pequeñas.</p> <p>EXTRACCION: Difícil de extraer.</p> <p>PAREDES: A comparación las paredes exteriores son más porosas.</p> <p>TEXTURA: Aparecieron grietas, pero no tan pronunciadas.</p> <p>MATERIA VOLATIL: Luego de cumplirse el tiempo continúan saliendo humos.</p>

550°C

**COLOR:** Burbujas superiores plateadas, marrón y un porcentaje mínimo contaba con azul metalizado, tamaño de burbujas pequeñas y grandes.

**EXTRACCION:** Difícil de extraer.

**PAREDES:** Porosas.

**TEXTURA:** En el proceso aparecieron grietas en su centro.

**MATERIA VOLATIL:** Al cumplirse el tiempo de la rampa continúa apareciendo humo.

**COLOR:** Burbujas superiores plateadas, tamaño de burbujas pequeñas y grandes.

**EXTRACCION:** Difícil de desencajar.

**PAREDES:** Porosas con pedacitos de grano siendo también plateado, altura desigual.

**TEXTURA:** En el proceso aparecieron grietas en su centro no tan pronunciadas.

**MATERIA VOLATIL:** Al cumplirse el tiempo de la rampa continúa apareciendo humo.

600°C

**COLOR:** Burbujas superiores marrón y dorado, tamaño de burbujas pequeñas y grandes, pero en su mayoría se ven pequeñas.

**EXTRACCION:** Aunque se redujo su tamaño fue difícil de extraer.

**PAREDES:** Porosas y endebles, color marrón y dorado en la parte superior mientras que la inferior gris.

**TEXTURA:** Frágil.

**MATERIA VOLATIL:** Al cumplirse el tiempo de la rampa, los humos disminuyen significativamente.

**COLOR:** Burbujas superiores plateadas, tamaño de burbujas pequeñas y grandes, pero en su mayoría se ven pequeñas.

**EXTRACCION:** Fácil de extraer pues ya se había partido la muestra.

**PAREDES:** Porosas.

**TEXTURA:** En el proceso aparecieron grietas en su centro.

**MATERIA VOLATIL:** Al cumplirse el tiempo de la rampa se reduce el humo formidablemente.

650°C

**COLOR:** Burbujas superiores plateadas, tamaño

**COLOR:** Burbujas superiores plateadas, marrón y un porcentaje mínimo

	<p>de burbujas pequeñas y medianas.</p> <p>EXTRACCION: Fácil de extraer ya que su masa se disminuyó.</p> <p>PAREDES: Redujo porosidad.</p> <p>TEXTURA: En el proceso aparecieron grietas en su centro, pero es compacta.</p> <p>MATERIA VOLATIL: Al cumplirse el tiempo de la rampa los humos se reducen.</p>	<p>contaba con azul metalizado, tamaño de burbujas pequeñas y grandes.</p> <p>EXTRACCION: Difícil de extraer.</p> <p>PAREDES: Porosas.</p> <p>TEXTURA: En el proceso aparecieron grietas en su centro.</p> <p>MATERIA VOLATIL: Al cumplirse el tiempo de la rampa la materia volátil se elimina a un 80%</p>
700°C	<p>COLOR: Burbujas superiores plateadas, tamaño de burbujas pequeñas y grandes.</p> <p>EXTRACCION: Fácil de extraer, se contrae al enfriarse</p> <p>PAREDES: Redujo porosidad.</p> <p>TEXTURA: En el proceso aparecieron grietas en su centro, pero es compacta y fácil de romper.</p> <p>MATERIA VOLATIL: Al cumplirse el tiempo de la rampa los humos se reducen hasta el punto de que estos ya no se observan a la salida de la chimenea.</p>	<p>COLOR: Burbujas superiores plateadas, tamaño de burbujas pequeñas y grandes.</p> <p>EXTRACCION: Fácil de extraer ya que su masa se disminuyó.</p> <p>PAREDES: Redujo porosidad.</p> <p>TEXTURA: En el proceso aparecieron grietas en su centro, pero es compacta.</p> <p>MATERIA VOLATIL: Al cumplirse el tiempo de la rampa y continuar con la rampa de sostenimiento, los humos se reducen significativamente. .</p>

---

Como se observa en la tabla 20, los mejores resultados se obtuvieron a temperaturas de 600, 650 y 700°C.

Teniendo en cuenta el peso inicial del carbón a 800 gr, se determinó la variación de la masa respecto a la temperatura.

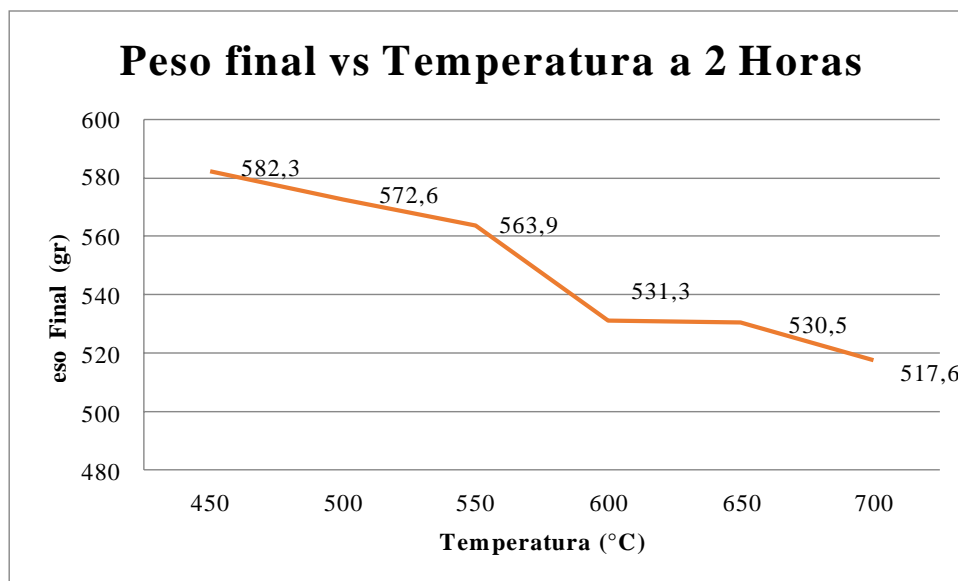
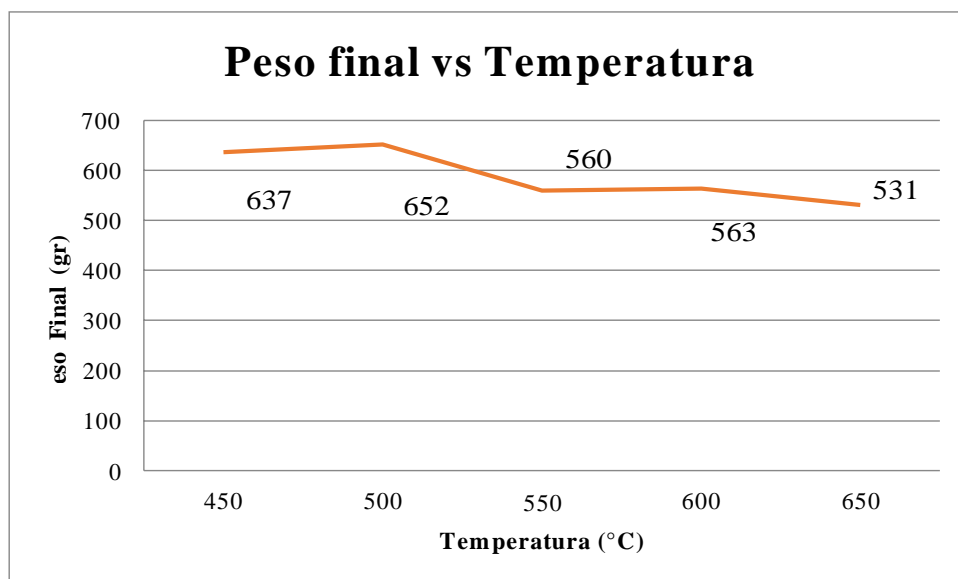


Figura 22. Peso final del carbón respecto a la temperatura aplicado a 2 horas.

La figura 22 está aplicada a la primer prueba realizada en 2 horas a diferentes temperaturas desde los 450 a 700°C donde el peso inicial fue de 800gr a cada muestra, como se puede observar a menor temperatura su peso aumenta a comparación de las temperaturas elevadas y a mayor temperatura el peso de la muestra disminuye en comparación a la temperatura de 450°C; con la temperatura de 450°C se observa el peso de la muestra más elevado, esto es debido a que el proceso se interrumpe evitando que el carbón termine de expulsar sus gases.

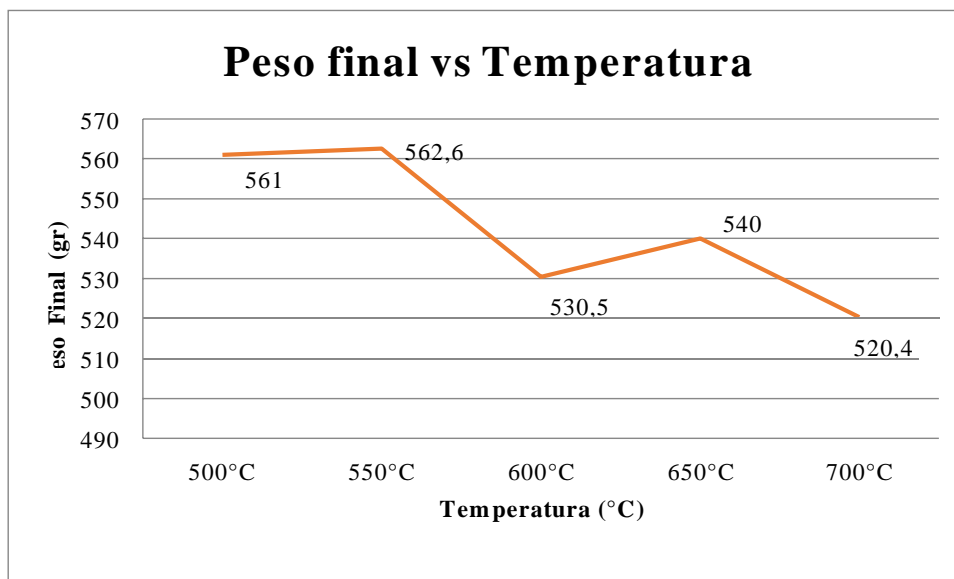
Aplicando el mismo método a las pruebas con diferencia tiempo a una hora se determina que a comparación de los resultados obtenidos a 2 horas esta pierde menos peso en las muestras pues a mayor temperatura el peso disminuye. Estos resultados se pueden apreciar en la figura 25.



*Figura 23.* Peso final del carbón respecto a la temperatura aplicado a 1 hora.

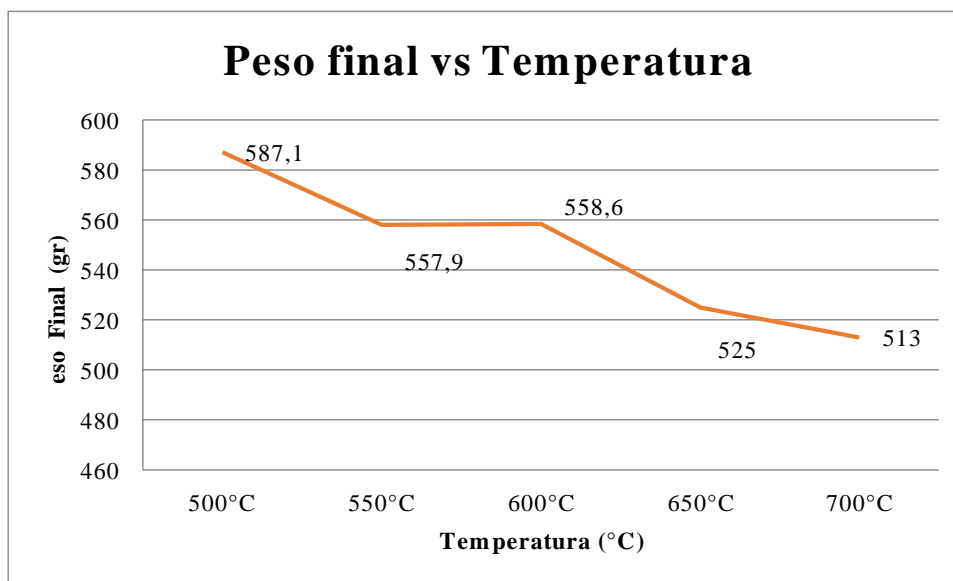
Teniendo en cuenta que en la mayoría de los casos habrá pérdida de peso se quiso determinar qué tanto es la pérdida en las rampas de 1 hora y media hora luego que de que se cumpliera la temperatura establecida. Aquí se presentan las figuras obtenidas a los diferentes tiempos.

#### Rampa a media hora



*Figura 24.* Peso final del carbón respecto a la temperatura aplicado a la rampa de media hora.

### Rampa a 1 hora



*Figura 25.* Peso final del carbón respecto a la temperatura aplicado a la rampa de 1 hora.

En las figuras 24 y 25 se puede observar que a menor temperatura la masa es elevada, mientras que a mayor temperatura la masa disminuye. El comportamiento del proceso no varía a mayor cantidad una de otra, pero comparando los datos de la figura 25 se observa que estos resultados son más estables aplicando el método de rampas en una hora.

En la gráfica 25 se muestra que el peso final en cada temperatura varía de manera inestable, en las temperaturas de 550°C y 650°C a esto le llamamos un margen de error pues lo ideal es que la muestra disminuya de peso y no aumente, por ende, se plantea que la caja donde se trabajó este proyecto no fue bien limpiada antes de su utilización.

En conclusión, a mayor tiempo de duración de la muestra a la temperatura especificada dentro de la mufla, mayor es la salida de materia volátil. En los siguientes gráficos se mostrará el comportamiento individual de cada temperatura aplicando su respectiva rampa, empleada después de que la mufla llega a la temperatura esperada.

### Rampa de 1 hora

T: 700°C  $t_{in}$ : 9:03 am

Tabla 21.

Análisis de la muestra a 700°C teniendo en cuenta el tiempo en que inicio el proceso.

Temperatura	Tiempo	Tiempo en minutos	Temperatura carbon
700°C	10,03	60 min	604°C
	10,19	76 min	640°C
	10,29	86 min	714°C

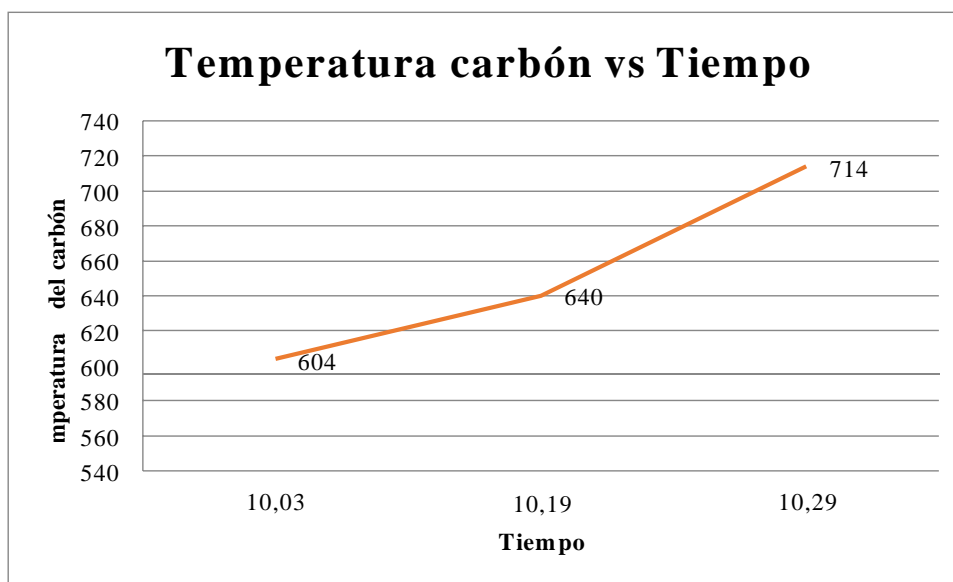


Figura 26. Tiempo que tarda el carbón en igualar la temperatura de 700°C

En la figura 26 se observa que la muestra de carbón alcanza la temperatura de la mufla en el tiempo de 86min, es importante mencionar que este tiempo es general ya que va desde el momento en que la prueba inicia. Esta prueba comenzó con su rampa de sostenimiento a las 10:03 am y finalizó a las 10:29 am, donde la muestra de carbón llegó hasta los 714°C, este fenómeno se debe a la inercia térmica, es decir, que las paredes del horno desprenden calor lo cual provocan que la muestra se caliente ligeramente.



Los intervalos de tiempo mostrado en la tabla fueron tomados de manera aleatoria para determinar la temperatura del carbón respecto a la medida dentro del horno. Este mismo proceso fue ejecutado en el resto de las temperaturas.

**T: 600°C  $t_{in}$ : 9:44 am**

Tabla 22.

Análisis de la muestra a 600°C teniendo en cuenta el tiempo en que inicio el proceso.

Temperatura	Tiempo	Tiempo en minutos	Temperatura carbón
600°C	10,44	60 min	351°C
	11,11	87 min	410°C
	11,18	94 min	587°C
	11,25	101 min	599°C
	11,31	107 min	607°C

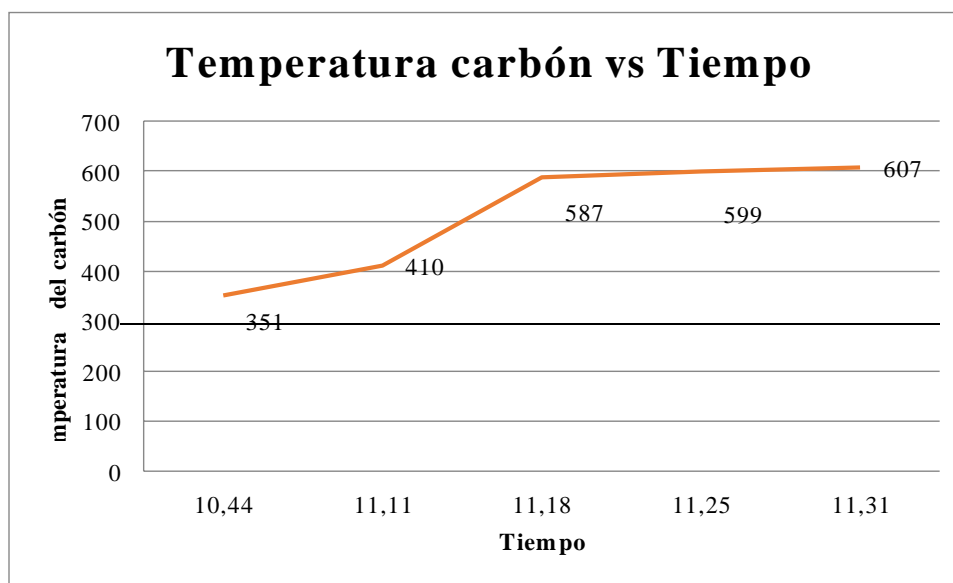


Figura 27. Tiempo que tarda el carbón en igualar la temperatura de 600°C

Los variación de los intervalos de tiempo es de mas o menos 7 min cada uno, esta prueba inicio a las 9:44 AM y finalizo a las 10:44 AM donde inicia con la rampa de sostenimiento, esta prueba tardo aproximadamente 47 min para que el carbon alcanzara la temperatura de los 600°C. Se debe tener en cuenta que la temperatura final pasó a los 600°C, esto se debe a la inercia

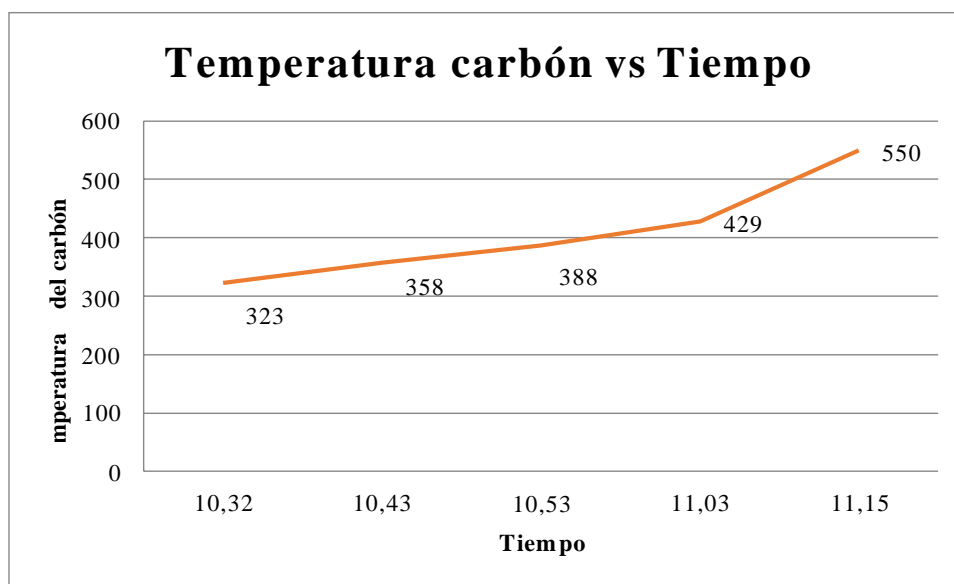
térmica, es decir, que las paredes del horno desprenden calor lo cual provocan que la muestra se caliente ligeramente.

**T: 550°C  $t_{in}$ : 9:32 am**

Tabla 23.

*Análisis de la muestra a 550°C teniendo en cuenta el tiempo en que inicio el proceso.*

Temperatura	Tiempo	Temperatura carbón
550°C	10,32	323
	10,43	358
	10,53	388
	11,03	429
	11,15	550



*Figura 28.* Tiempo que tarda el carbón en igualar la temperatura de 550°C

El tiempo de inicio de esta prueba fue a 9:32 AM y finalizó la primera rampa a las 10:32 AM, los intervalos de tiempo varían con aproximadamente 10 min cada uno. Esta prueba tarda 43 min más o menos en que el carbón alcance la temperatura requerida.

**T: 500°C  $t_{in}$ : 9:00 am**

Tabla 24.

Análisis de la muestra a 500°C teniendo en cuenta el tiempo en que inicio el proceso.

Temperatura	Tiempo	Temperatura carbón
500°C	10	257
	10,11	290
	10,23	368
	10,39	406
	11	454

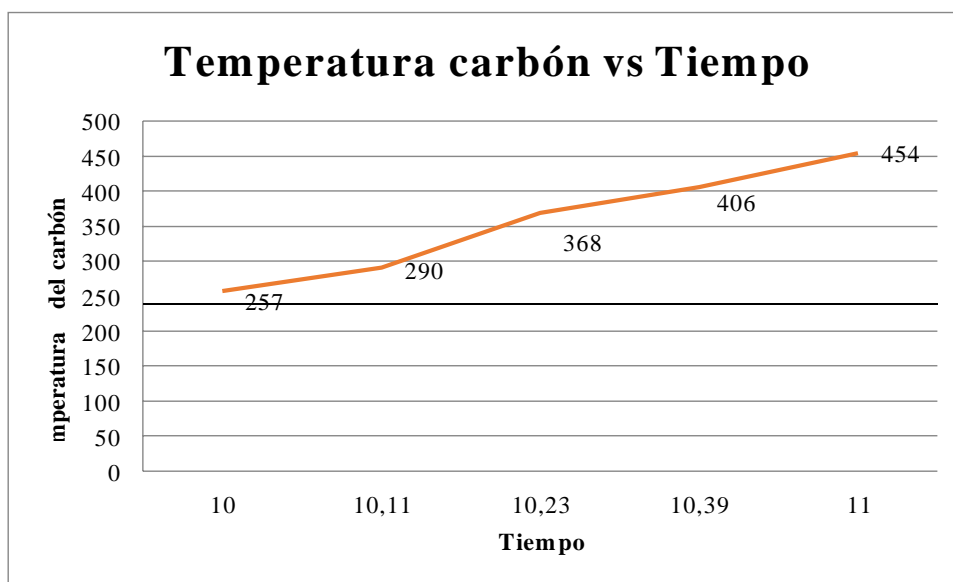


Figura 29. Tiempo que tarda el carbón en igualar la temperatura de 500°C.

El tiempo de inicio de esta prueba fue a 9:00 AM y finalizó su primera rampa a las 10:00AM, los intervalos de tiempo no son constantes. El carbón no alcanza a igualar la temperatura de 500°C porque los gases siguen apareciendo al finalizar la segunda rampa.

### Segunda rampa a media hora

**T: 700°C  $t_{in}$ : 9:37 am**

Tabla 25.

Análisis de la muestra a 700°C teniendo en cuenta el tiempo en que inicio el proceso.

Temperatura	Tiempo	Temperatura carbón
700°c	10,37	596
	10,49	640
	10,58	693
	11,05	700

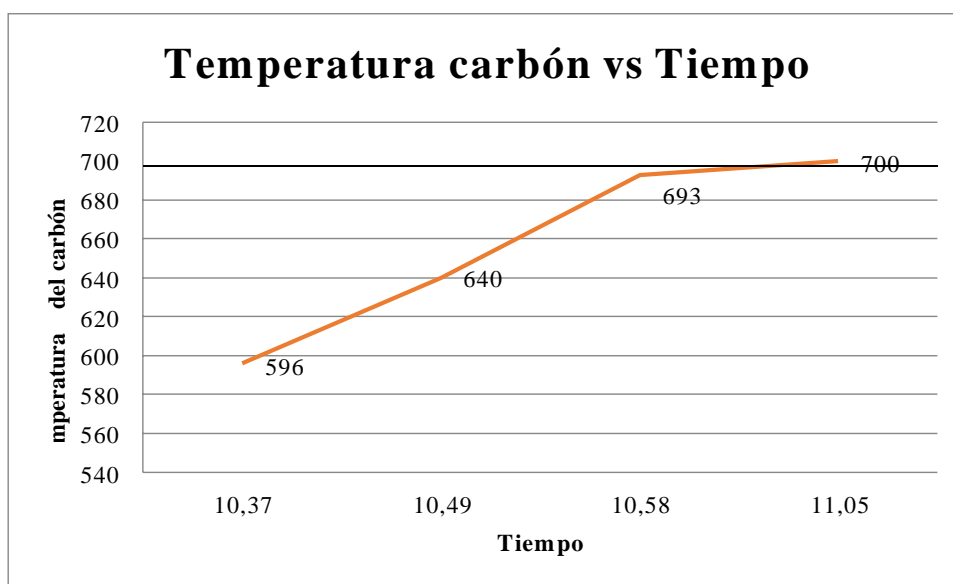


Figura 30. Tiempo que tarda el carbón en igualar la temperatura de 700°C.

Tiempo de inicio 9:37 AM, tiempo de finalización e inicio a segunda rampa 10:37 AM. Al cumplir 30 min luego que finalizara la primera rampa el carbón logra igualar la temperatura del horno.

**T: 650°C  $t_{in}$ : 9:11 am**

Tabla 26.

Análisis de la muestra a 650°C teniendo en cuenta el tiempo en que inicio el proceso.

Temperatura	Tiempo	Temperatura carbón
650°c	10,11	480
	10,24	543
	10,35	627
	10,44	650

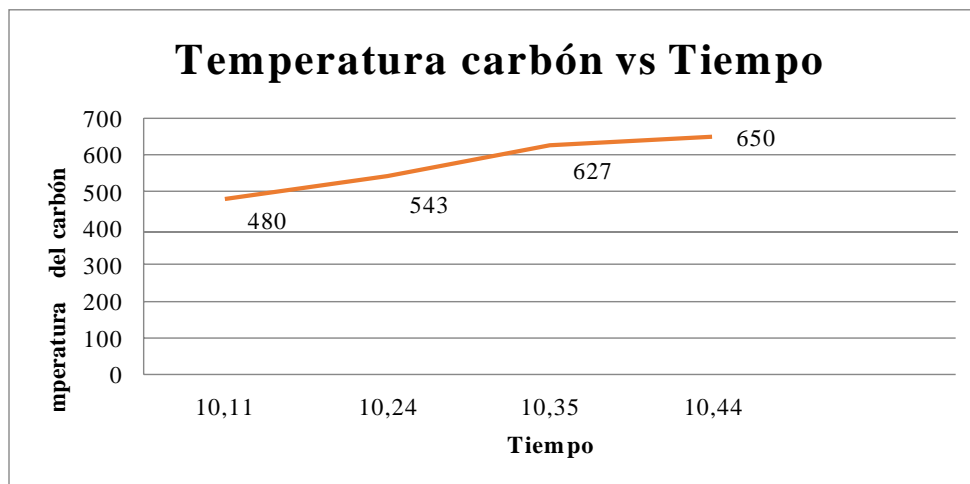


Figura 31. Tiempo que tarda el carbón en igualar la temperatura de 650°C.

Tiempo de inicio 9:11 AM, tiempo de finalización e inicio a segunda rampa 10:11AM. En la gráfica anterior se muestra que el carbón a los 30 min logra igualar la temperatura.

**T: 550°C  $t_{in}$ : 10:24 am**

Tabla 27.

Análisis de la muestra a 550°C teniendo en cuenta el tiempo en que inicio el proceso.

Temperatura	Tiempo	Temperatura carbón
550°C	11,24	262
	11,34	346
	11,44	457
	11,55	480
	12,11	558

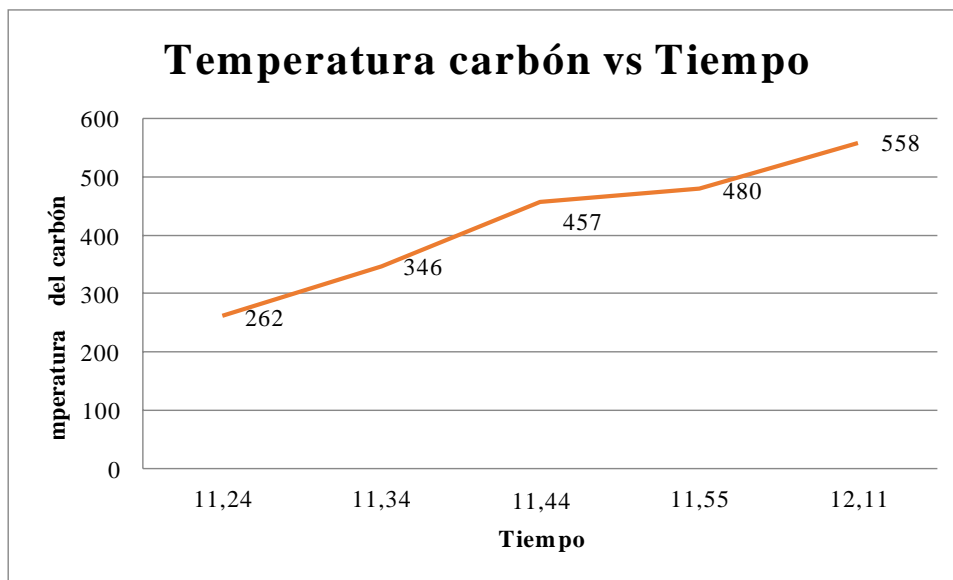


Figura 32. Tiempo que tarda el carbón en igualar la temperatura de 550°C.

Tiempo de inicio 10:24 AM, tiempo de finalización e inicio a segunda rampa 11:24 AM. En la gráfica anterior se muestra que el carbón a los 30 min no logra igualar la temperatura, por esta razón se decidió dejar un poco más de tiempo en el proceso para visualizar cual sería el tiempo máximo en que la prueba alcanzara la temperatura requerida.

#### 4.5 Cálculos térmicos.

Estos cálculos se realizaron para determinar el balance energético en la transformación del carbón a semicoque teniendo en cuenta la composición del carbón utilizado para los ensayos, estas propiedades de muestran en la sección 3.3.

##### ✓ Características del Carbón

Wet=3,34%  
 Czdry=7,55%  
 CF=54,9%  
 FSI=7,5  
 Mv=37,55%

##### ✓ Chimenea - temperatura de gases en chimenea.

(Datos tomados del informe de estudio de emisiones atmosféricas.)

$T_{ch}=1031$  [K]

$$T_{ch} = 758 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

✓ **Propiedades del gas en chimenea**

(Datos tomados del informe de estudio de emisiones atmosféricas.)

$$P_{ch} = 98.87 \text{ kPa}$$

$$P_o = 101.325 \text{ kPa}$$

✓ **Flujo volumétrico de gases por chimenea**

(Datos tomados del informe de estudio de emisiones atmosféricas.)

$$FV=81,39 \text{ [m}^3\text{/s]}$$

$$D_{ch}= 3,7 \text{ [m]}$$

✓ **Temperatura a la que se ingresa el carbón en el ducto para coquizar.**

(Donde  $T_o$  es la temperatura ambiente)

$$T_o=293 \text{ [K]}$$

✓ **Temperatura mínima supuesta de los gases a la salida de la chimenea para evitar condensación de algún componente**

$$T_{oh}= 473 \text{ [K]}$$

✓ **Temperatura a calentar el carbón para transformar a semicoque.**

(Se utilizó esta temperatura porque es la específica para el proceso de semicoquización,  $973 \text{ [K]} = 700 \text{ }^\circ\text{C}$ )

$$T_{sc}=973 \text{ [K]}$$

✓ **Temperatura media a calentar el carbón para transformar a semicoque.**

$$T_m = \frac{T_{sc} + T_o}{2}$$

$$T_m=635.5 \text{ K}$$

$$A = \frac{\pi * D_{ch}^2}{4}$$

$$A= 10.75 \text{ m}^2$$

✓ **Flujo másico de gases por chimenea.**

(Se aplica la ecuación del gas ideal para un flujo.)

$$F_m = \frac{P_{ch} * FV}{R_{gas} * T_{ch}}$$

Valor calculado por el software según la ecuación anterior

$$F_m = 27.51 \text{ kg/s}$$

✓ **Rgas y Cp calculados con la composición promedio de gases a 300 K. N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, S.**

(Se utilizaron estos gases ya que se trabajó con referencia de la figura 6 del presente proyecto, en esa misma referencia se utilizó el valor aproximado de los gases)

$R_{gas}$  = Constante promedio de gases (R) a la salida.

$$R_{gas} = 0,2968*0,77 + 0,2598*0,17 + 0,1889*0,055 + 0,1298*0,005 \text{ [kJ/kg-K]}$$

$$R_{gas} = 0,2837 \left( \frac{\text{kJ}}{\text{kg-K}} \right)$$

✓ **Cp de los humos**

(La composición de los humos en algunos elementos se encontró en el informe de emisiones, como el Oxígeno y el Azufre, mientras que el Nitrógeno se saca por diferencia)

$$C_{ph} = 1,1*0,77 + 1,043*0,17 + 1,126*0,055 + 0,6228*0,005 \text{ [kJ/kg-K]}$$

$$C_{ph} = 1,089 \left( \frac{\text{kJ}}{\text{kg-K}} \right)$$

✓ **Energía de los gases en chimenea durante los 6000 s que dura el proceso.**

$$Q_{ch} = F_m * C_{ph} * T_{ch} * t_c$$

Donde:

$Q_{ch}$  = Calor de la chimenea disponible durante los 6000 s

$F_m$  = Flujo másico de humos

$C_{ph}$  = Cp de los humos

$T_{ch}$  = Temperatura de humos en chimenea

$t_c$  = Tiempo aproximado que tarda el carbón dentro de la caja en alcanzar la temperatura externa para semicoquizar

$$Q_{ch} = 1,854E+08 \text{ (kJ)}$$

✓ **Entropía de gases en chimenea**

Instrucciones para determinar la entropía de cada gas a la temperatura y presión de chimenea por el software EES

Schn=Entropy (N<sub>2</sub>; T=Tch; P=Pch)

Scho=Entropy (O<sub>2</sub>; T=Tch; P=Pch)

Schco2=Entropy (CO<sub>2</sub>; T=Tch; P=Pch)

Schs=Entropy (SO<sub>2</sub>; T=Tch; P=Pch)

Valores para cada variable calculados por el software



$$Schco2=6,159 \text{ [kJ/kg-K]}$$

$$Schn=8,184 \text{ [kJ/kg-K]}$$

$$Scho=7,649 \text{ [kJ/kg-K]}$$

$$Schs=4,799 \text{ [kJ/kg-K]}$$

✓ **Entropía de gases a  $T_{oh}$ .**

$$Son=\text{Entropy (N}_2; T=T_{oh}; P=P_o)$$

$$Soo=\text{Entropy (O}_2; T=T_{oh}; P=P_o)$$

$$Soco2=\text{Entropy (CO}_2; T=T_{oh}; P=P_o)$$

$$Sos=\text{Entropy (SO}_2; T=T_{oh}; P=P_o)$$

Valores para cada variable calculados por el software

$$Soco2=5,279 \text{ [kJ/kg-K]}$$

$$Son=7,317 \text{ [kJ/kg-K]}$$

$$Soo=6,84 \text{ [kJ/kg-K]}$$

$$Sos=4,181 \text{ [kJ/kg-K]}$$

✓ **Energía disponible para extraer a los humos (Disponibilidad)**

(La temperatura de 200°C es supuesta y es mínima, para que no se condensen componentes y facilitar la salida por la en la chimenea)

$$Ex = Fm * (-(schn - son) * 0,78 + (scho - soo) * 0,16 + (schco2 - soco2) * 0,055 + (schs - sos) * 0,005) * (To)) + Cph * (Tch - To))$$

$$Ex = 27.51 \frac{kg}{s} * (-(8.184 - 7.317) * 0.78 + (7.649 - 6.84) * 0.16 + (6.519 - 5.279) * 0.055 + (4.799 - 4.181) * 0.005) \frac{kJ}{kg-K} * 293 K) + 1.089 \frac{kJ}{kg-K} * (931 - 293)K)$$

Valor calculado por el software con base en la ecuación anterior:

$$Ex = 14938 \left(\frac{kJ}{s}\right)$$

✓ **Disponibilidad durante  $t_c$**

$$Ext = Ex * t_c$$

Valor calculado por el software

$$Ext = 8,963E + 07 \text{ [kJ]}$$

✓ **Energía para la transformación del carbón a semicoque.**

Se determina el calor específico para la transformación del carbón a semicoque con la Formula de Lee en función de  $T_m$  y  $m_v$ . Ref [25]

$$C_{psc} = \frac{(443,5 + 1,036 * T_m + (11,862 + 0,0071 * T_m) * mv)}{1000} \left( \frac{kJ}{kg - K} \right)$$

Donde:

$C_{psc}$ : Calor específico para transformar el carbón a semicoque .

$T_{sc}$ : Temperatura a calentar el carbón para transformar a semicoque.

$T_o$ : Temperatura a la que se ingresa el carbón en el ducto para coquizar

Valor calculado por el software

$$C_{psc} = 1,713 \left( \frac{kJ}{kg - K} \right)$$

- ✓ **Calor necesario por caja para transformar el carbón a semicoque por kg de carbón:**

$$q_{sc} = C_{psc} * (T_{sc} - T_o)$$

$$q_{sc} = 1165 [kJ/kg]$$

- ✓  **$t_c$  = Tiempo que tarda el carbón dentro de la caja en alcanzar la temperatura exterior ( $T_{sc}$ )**

(Se utilizó una hora y cuarenta minutos debido a que es el tiempo exacto donde se puede analizar el proceso de semicoquización aplicando rampas de sostenimiento)

$$t_c = 6000 [s]$$

- ✓ **Volumen de caja, se llena el 75%**

$$V_c = (2,0 * 0,2 * 1,0) [m^3]$$

$$V_{cc} = V_c * 0,75$$

$$V_{cc} = 0,3 [m^3]$$

- ✓ **Densidad del carbón en la caja.**

(La densidad fue calculada respecto al volumen y la masa de carbón depositado en la caja utilizada)

$$\rho_c = 600 [kg/m^3]$$

- ✓ **Masa de carbón por caja**

$$m_{cc} = \rho_c * V_{cc}$$

$$m_{cc} = 180 [kg]$$

- ✓ **Calor necesario para semicoquizar por caja**

Este calor por caja se extrae a los humos que vienen de la batería en los 6000 s

$$Q_{caja} = m_{cc} * q_{sc}$$

Valor calculado por el software

$$Q_{caja} = 209728 \text{ [kJ]}$$

✓ **Nc= Número de cajas a acomodar dentro del ducto.**

(Este valor puede variar respecto a las medidas del horno de semicoquización que se esté utilizando)

$$N_c = 9$$

$$Q_{tcajas} = N_c * Q_{caja}$$

Valor calculado por el software

$$Q_{tcajas} = 1,888E+06 \text{ [kJ]}$$

✓ **Calor que produce el carbón en la transformación a semicoque.**

$$Q_{pS} = m_{cc} * N_c * (H_2 + CH_4 + C_2H_6 + C_2H_4 + CO + H_2S)$$

✓ Valor promedio que se produce del componente en (m<sup>3</sup>/kg) de carbón a la temperatura media que se produce. Tomado de fig. 6.

$$V_{H_2} = 0,35 \left( \frac{m^3}{kg} \right)$$

$$V_{CH_4} = 0,018 \left( \frac{m^3}{kg} \right)$$

$$V_{C_2H_6} = 0,002 \left( \frac{m^3}{kg} \right)$$

$$V_{C_2H_4} = 0,002 \left( \frac{m^3}{kg} \right)$$

$$V_{CO} = 0,007 \left( \frac{m^3}{kg} \right)$$

$$V_{H_2S} = 0,001 \left( \frac{m^3}{kg} \right)$$

✓ Poder calorífico Hi de cada componente (kJ/m<sup>3</sup>). Tomado de [26]

$$Hi_{H_2} = 10760 \left( \frac{kJ}{m^3} \right)$$

$$Hi_{CH_4} = 35878 \left( \frac{kJ}{m^3} \right)$$

$$Hi_{C_2H_6} = 64480 \left( \frac{kJ}{m^3} \right)$$

$$Hi_{C_2H_4} = 54497 \left( \frac{kJ}{m^3} \right)$$

$$Hi_{CO} = 12645 \left( \frac{kJ}{m^3} \right)$$

$$Hi_{H_2S} = 13278 \left( \frac{kJ}{m^3} \right)$$

- ✓ Fracción de tiempo con respecto a los 6000 s que dura produciéndose cada componente, tomado de fig. 6.

$$t_{H_2} = 800/6000 \text{ [s/s]}$$

$$t_{CH_4} = 900/6000$$

$$t_{C_2H_6} = 750/6000$$

$$t_{C_2H_4} = 800/6000$$

$$t_{CO} = 750/6000$$

$$t_{H_2S} = 600/6000$$

Valores calculados por el programa

$$t_{CH_4} = 0,15 \text{ (s/s)}$$

$$t_{CO} = 0,125 \text{ (s/s)}$$

$$t_{C_2H_4} = 0,1333 \text{ (s/s)}$$

$$t_{C_2H_6} = 0,125 \text{ (s/s)}$$

$$t_{H_2} = 0,1333 \text{ (s/s)}$$

$$t_{H_2S} = 0,1 \text{ (s/s)}$$

- ✓ Energía de cada componente que sale del carbón en la transformación a semicoque

$$H_2 = (V_{H_2} * H_{iH_2} * t_{H_2})$$

$$CH_4 = (V_{CH_4} * H_{iCH_4} * t_{CH_4})$$

$$C_2H_6 = (V_{C_2H_6} * H_{iC_2H_6} * t_{C_2H_6})$$

$$C_2H_4 = (V_{C_2H_4} * H_{iC_2H_4} * t_{C_2H_4})$$

$$CO = (V_{CO} * H_{iCO} * t_{CO})$$

$$H_2S = (V_{H_2S} * H_{iH_2S} * t_{H_2S})$$

Valores calculados por el software

$$H_2 = 502,1 \left( \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right)$$

$$C_2H_4 = 14,53 \left( \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right)$$

$$C_2H_6 = 16,12 \left( \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right)$$

$$CH_4 = 96,87 \left( \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right)$$

$$CO = 11,06 \left( \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right)$$

$$H_2S = 1.328 \left( \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right)$$

- ✓ Aplicando la ecuación:

$$Q_{pS} = m_{cc} * N_c * (H_2 + CH_4 + C_2H_6 + C_2H_4 + CO + H_2S)$$

Valor calculado por el software:

$$Q_{pS}=1,040E+06 \text{ [kJ]}$$

- ✓ Calor total que sale por chimenea después de la semicoquización

$$Q_{salChi} = (Q_{ch} - Q_{tcajas} + Q_{pS})$$

$$Q_{salChi} = 1.845E + 8 \text{ kJ}$$

- ✓ Porcentaje de energía consumida con respecto a la proveniente de la batería de hornos de coquización

$$Energy = \frac{Q_{tcajas}}{Q_{ch}} * 100 [\%]$$

$$Energy=1,013 [\%]$$

Los resultados de las ecuaciones anteriores presentan valores específicos teniendo en cuenta las ecuaciones. Según las dimensiones de la chimenea se propone trabajar con nueve (9) cajas para la producción de semicoque, el calor necesario para semicoquizar por caja es de 209728 [kJ] y cuenta con un tiempo de 6000 s dentro de la caja en alcanzar la temperatura exterior.

#### **4.6 Diseño de la cámara para producción de semicoque.**

Para el diseño de la cámara de producción de semicoque, se tuvo en cuenta el modelo propuesto por [5], por ello se presentará un modelo similar donde se aprovecharán los gases generados por las cámaras de coquización para la producción del semicoque.

Se optó por diseñar un modelo convencional de bóveda semiesférica y de forma cilíndrica con un diámetro de 3 metros, la conformación por parejas formara un batería de 3 hornos.

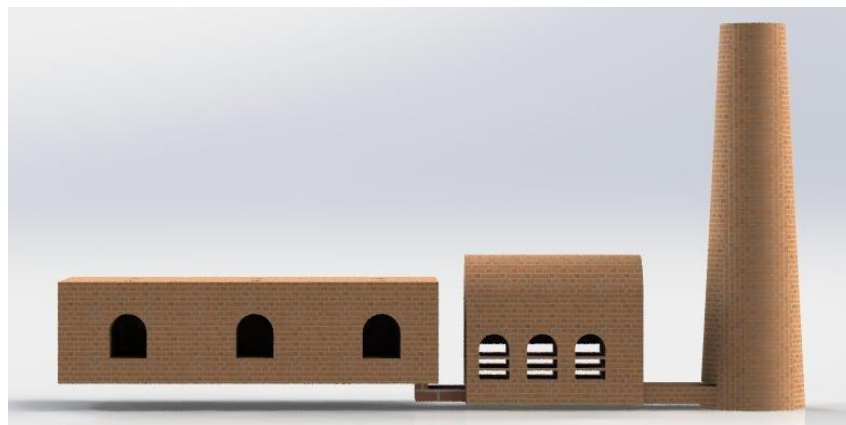


Figura 33. Diseño demostrativo del sistema de producción de coque y semicoque.

El diseño demostrativo consta de un horno coquizador, cuyos gases son recolectados por un ducto principal e ingresado por un ducto a la batería del horno coquizador, el diseño fue realizado en el Software Solidworks. En la figura 34 se mostrará los elementos que conforman este diseño.

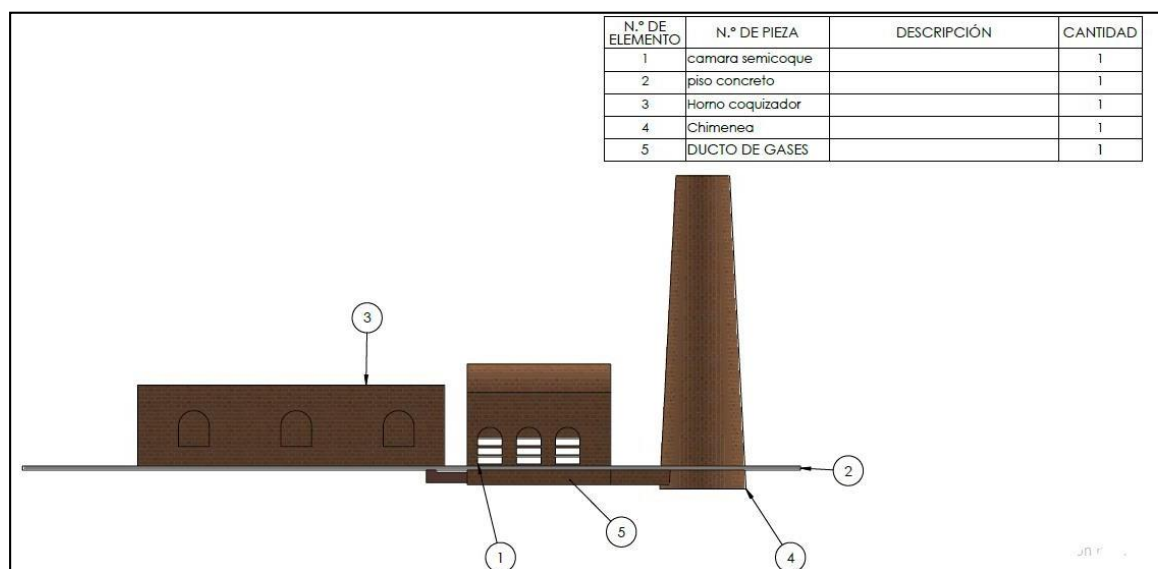


Figura 34. Elementos que conforman el diseño de semicoquización.

El diseño variará sus medidas de acuerdo con la capacidad de los hornos, para el caso estudiado ambos hornos tanto el coquizador, como el semicoquizador utilizaran una batería de 3 hornos cada uno.

Para diferentes capacidades de hornos y cantidad de baterías las medidas pueden variar tanto el diámetro de los ductos de recolección como de los otros elementos que lo compongan. En la figura 35 se mostrará las dimensiones del horno para semicoquizar.

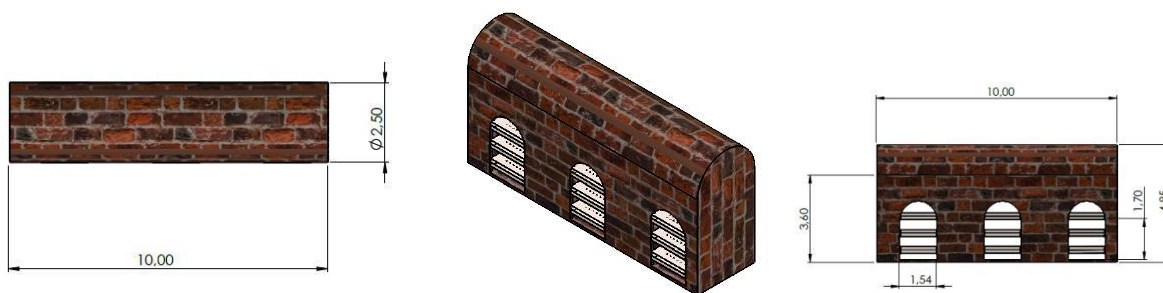


Figura 35. Dimensiones horno de semicoque.

Como se mencionó anteriormente, las dimensiones del horno de la figura 35 pueden variar dependiendo las necesidades de los clientes, hay que tener en cuenta que este diseño no contiene cálculos de perdidas debido a que el material sugerido es ladrillo refractario.

Teniendo en cuenta el horno mostrado en la figura 35 se presentará el diseño de las bandejas que serán utilizadas en la implementación de este sistema.

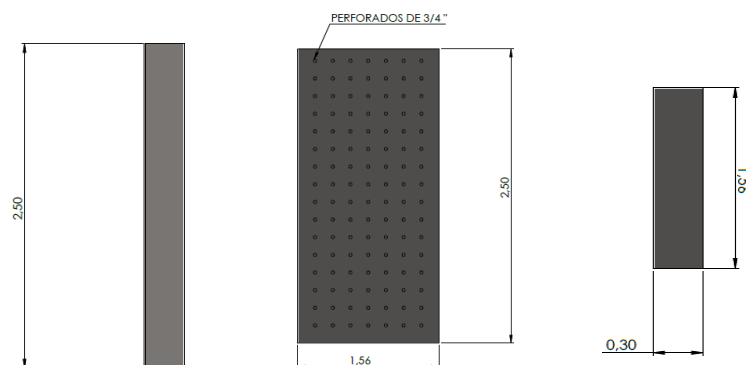


Figura 36. Dimensiones de la caja a utilizar.

Lo ideal de este diseño de bandeja es que cuenta con orificios en la parte superior, estos permiten que el calor entre por calentamiento directo e indirecto a la muestra.



## 5. Conclusiones

Con la presente investigación se puede inferir que el rango ideal de temperatura para semicoquizar el carbón es entre 600 y 700°C con rampa de temperatura permitiendo que toda la muestra alcance dicha temperatura.

La temperatura es un factor importante para la semicoquización porque define la estructura del carbón, eliminación de agua, materia volátil, grado de condensación y grafitización de átomos de carbono. Cuando aumenta la temperatura aumenta la salida de volátiles.

De acuerdo con la sección y largo del ducto a la entrada de la chimenea, se propone utilizar sólo nueve (9) cajas, que se colocarán en el área transversal del ducto, para que las pérdidas de energía debidas a la fricción y reducción de área donde se colocaran las cajas no afecten el tiro de la chimenea y el funcionamiento normal de la batería de hornos de coquización y la salida de los humos por la chimenea.

Al calentar carbón para someterlo al proceso de semicoquización genera gases combustibles, que poseen energía y que se incorporan a los humos provenientes de la batería de coquización, por lo cual parte de la energía utilizada para la semicoquización se restablece al flujo de humos por la chimenea.

## 5. Bibliografía

- [1] S. Liu, J. Shangguan, S. Yang, W. Du, X. Yan, and K. Zhang, “Producing Effective and Clean Coke for Household Combustion Activities to Reduce Gaseous Pollutant Emissions,” vol. 2019, no. x, 2019.
- [2] Sectorial, “Carbón, lo que más se Exporta en Norte de Santander.,” *06 Marzo*, 2019. [Online]. Available: <https://www.sectorial.co/informativa-carbon/item/218117-carbón,-lo-que-más-se-exporta-en-norte-de-santander#:~:text=Según el reporte del Departamento,%24270%2C2 millones de dólares.&text=2%25%2C 143.6%25 y 168%25%2C respectivamente en 2018.>
- [3] R. Semana, “Así repuntan los carboneros de Norte de Santander.,” *07 Noviembre*, 2017. [Online]. Available: [https://www.semana.com/contenidos-editoriales/carbon-la-base-de-todo-/articulo/la-industria-del-carbon-en-santander/535784.](https://www.semana.com/contenidos-editoriales/carbon-la-base-de-todo-/articulo/la-industria-del-carbon-en-santander/535784)
- [4] Peter Cashion, “Urgewald,” *Global Coal Exit List 2020*, 2020. [Online]. Available: [https://coalexit.org/database?name=&production=All&power\\_capacity=All&revenue=All&field\\_divest\\_cspp=All&page=0.](https://coalexit.org/database?name=&production=All&power_capacity=All&revenue=All&field_divest_cspp=All&page=0)
- [5] S. Alvarez, “Optimización de la planificación forestal considerando la captura de carbono en bosque de pino-encino de la Sierra Juárez, Oaxaca (México),” UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS DE MONTES UNIVERSIDAD DE LA SIERRA JUÁREZ, 2015.
- [6] DIAN, “Avance de comercio exterior.,” Colombia, 2019.
- [7] F. Hoja, D. E. R. Para, and S. Academico, “Universidad francisco de paula santander ocaña,” 2012.
- [8] A. Y. Carlos Casadiego, Pedro Perez, Pedro Rojas, Segundo Ruge, Jorge Medina, Miguel

- Briseño, “PLANTA DEMOSTRATIVA DE COQUIZACIÓN DE LA ENERGÍA DE LOS GASES Y MINIMA CONTAMINACIÓN.,” Cúcuta Norte De Santander, p. 7, Sep-1996.
- [9] R. Buczynski, R. Weber, R. Kim, and P. Schwöppe, “Investigation of the heat-recovery / non-recovery coke oven operation using a one-dimensional model,” *Appl. Therm. Eng.*, 2018.
- [10] J. Hou *et al.*, “Comparison analysis of pollutant emissions factor for Lantan combustion instead of raw coal,” no. Icmnce, pp. 3–6, 2015.
- [11] L. Ma, SJ and Liu, XF and Dai, JZ and Dai, CS and Liu, XP and Liang, “Combustion performance of semi-coke from Inner Mongolia lignite under mild pyrolysis conditions,” *J. China Coal Soc.*, vol. 40, pp. 1153–1159, 2015.
- [12] Z. E.-I. P. LIMITED, “semi-coke- @ www.indiamart.com,” *Indiamart*. [Online]. Available: <https://www.indiamart.com/proddetail/semi-coke-1924678348.html>.
- [13] E. P. and J. J. R. Motlep, K. Kirsimae, P. Talviste, “Mineral composition of Estonian oil shale semi-coke sediments.,” vol. 24, no. 3, 2007.
- [14] S. C. I. and C. Group, “semicoke-ventajas @ www.chinasemicoke.com,” 2019. [Online]. Available: <https://www.chinasemicoke.com/news/semicoke-22194193.html>.
- [15] S. C. I. and C. Group, “what-is-the-difference-between-semi-coke-and-c-18290155 @ www.chinasemicoke.com,” 2018. [Online]. Available: <https://www.chinasemicoke.com/news/what-is-the-difference-between-semi-coke-and-c-18290155.html>.
- [16] S. C. I. and C. Group, “production-technology-of-semi-coke-18290179 @ www.chinasemicoke.com,” 2018. [Online]. Available:

- <https://www.chinasemicoke.com/news/production-technology-of-semi-coke-18290179.html>.
- [17] Nabertherm, “labor\_retortenoefen @ www.nabertherm.com.” [Online]. Available: [https://www.nabertherm.com/produkte/details/es/labor\\_retortenoefen](https://www.nabertherm.com/produkte/details/es/labor_retortenoefen).
- [18] J. O. E. Ralph and H. Aviles, “CHIMBORAZO Espoch,” ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO., 2011.
- [19] A. liquide engineering y Construction., “lurgi-megamethanol @ www.engineering-airliquide.com.” [Online]. Available: <https://www.engineering-airliquide.com/es/lurgi-megamethanol>.
- [20] G. A. S. Natural, “Universidad nacional de ingeniería,” UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA, 2010.
- [21] Connect2india, “semi-coke-importers @ connect2india.com,” *Semi Coke Buyers And Importers*. [Online]. Available: <https://connect2india.com/semi-coke-importers>.
- [22] ramas y aplicaciones. Geología, “Carbón,” 2018. [Online]. Available: <https://geologiaweb.com/rocas-sedimentarias/carbon/>.
- [23] V. J. Cort, “Prof. Dr. Vicente J. Cortés 1,” pp. 1–47.
- [24] J. Saiz, “Proceso de baterías de cok,” 2015.
- [25] D. V. Zinov’ev and P. Sole, “Quaternary codes and biphasic sequences from Z8-codes,” *Probl. Peredachi Informatsii*, vol. 40, no. 2, pp. 50–62, 2004.
- [26] U. Francisco and D. E. P. Santander, “Combustión básica,” 2016.