

Trabajo de Diploma

Para Optar por el Título de
Ingeniero Mecánico

**SIMULACIÓN DEL PROCESO DE ACTIVACIÓN DE
CARBÓN VEGETAL EN UN HORNO CILÍNDRICO
ROTATORIO.**

Autor: Anniel Pérez Laffita.

Tutor: Prof. Asist., Ing. Carlos Zalazar Oliva, Ms. C.

Moa, 2017
“Año 59 de la Revolución”

Declaración de autoridad

DECLARACIÓN DE AUTORIDAD

Yo: Anniel Pérez Laffita

Autor de este trabajo de diploma, certifico su propiedad a favor del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa” Dr. Antonio Núñez Jiménez”, el cual podrá hacer uso del mismo con la finalidad que estime conveniente.

Anniel Pérez Laffita

Ms. C. Carlos Zalazar Oliva

Dedicatoria

Con todo mi amor:

Para mi familia en especial mi madre, mi hermano y mi papá:

- *Maira Laffita Ortiz*
- *Adriannis Pérez Laffita*
- *Hector Manuel Pérez Quevedo*

Para mis tías y tíos:

- *Alicia y Ana Rita*
- *Orlando y Alejandro*

Para mis primos:

- *Alexennis Sablón*
- *Aliriennis Sánchez*
- *Edivan Sablón.*
- *Alexey Sablón.*

Para mi novia, suegra y cuñado:

- *Daniela Vega Tellez*
- *Yomeidis Téllez Fuentes*
- *Javier Vega Tellez*

Agradecimientos.

Mis agradecimientos a quienes de forma desinteresada ayudaron a la realización de este trabajo, y en especial:

A Dios por darme las fuerzas necesarias para salir adelante, a mi tutor Carlos Zalazar Oliva, a mi familia que me ha apoyado mucho en estos momentos y a mis amistades y compañeros de estudio.

A todos, muchas gracias.

Resumen General

En la presente investigación se realizó la simulación del proceso de activación de carbón vegetal, en un horno cilíndrico horizontal rotatorio, con el objetivo de obtener los parámetros óptimos del mismo. Para ello, se consideraron las principales variables que intervienen en el proceso como: flujo de carbón, gases de la combustión, vapor de agua y la temperatura del gas. Además, se realizó la caracterización de los principales fenómenos de transferencia de calor y de masa que ocurren en el objeto de estudio. A partir de un diseño de experimento y la aplicación informática especializada, se hicieron las simulaciones pertinentes y se establecieron las relaciones existentes entre los parámetros de operación ya mencionados. En el análisis de los principales resultados, se llegó a la conclusión que los valores más favorables para el proceso se obtienen para: temperatura de entrada del gas de 1100 a 1200°C, flujo de carbón de 120 a 130 kg/h y flujo de vapor de 300 a 320 kg/h, obteniéndose valores de rendimiento entre un 70 y 80 %.

Abstract

Abstract

In the present research, the simulation of the process of coal activation in a cylindrical horizontal rotatory oven for the sake of obtaining the optimal parameters of the same was accomplished. For it, was considered the principal variables of the process, like: flow of coal, gases of combustion, steam and the temperature of the gas. Besides, characterization of the principal heat and mass transfer phenomena that happened in it was made. It was made an experimental design, which was validated with the specialized software application, which was made possible the knowledge of an existent relation between the parameters of operation mentioned above. The results shown that the most favorable values of the entrance temperature of gas are in the range of 1100 to 1200 °C, the coal flow between 120 and 130 kg/h and the flow of steam into 300 and 320 kg/h, with values of performance between a 70 and 80 %.

TABLA DE CONTENIDO

Introducción.....	1
CAPÍTULO 1: MARCO TEÓRICO E INVESTIGATIVO DEL PROCESO DE ACTIVACIÓN DE CARBÓN.....	4
1.1. Introducción.....	4
1.2. Generalidades del proceso de activación del carbón	4
1.2.1. Materiales empleados para la fabricación de carbones activados.....	4
1.2.2. Equipos para la obtención de carbón activado	6
1.2.3. Métodos de fabricación de carbón activado.....	7
1.2.4. Clasificación del carbón activado.....	9
1.3. Flujo tecnológico.....	10
1.4. Descripción de la instalación	13
1.5. Procesos que intervienen en la activación dl carbón en el objeto de estudio...	14
1.5.1. Transferencia de calor del sólido a la pared cubierta.....	15
1.5.2. Transferencia de calor por convección del gas a la pared no cubierta por el sólido	16
1.5.3. Convección del gas a la superficie expuesta del sólido	17
1.5.4. La transferencia de calor por radiación	18
1.6. Conclusiones del capítulo.....	19
CAPÍTULO 2. PROCEDIMIENTOS PARA LA MODELACIÓN Y SIMULACIÓN DEL PROCESO DE ACTIVACIÓN DE CARBÓN.....	20
2.1. Introducción.....	20
2.2. Modelo matemático para la activación de carbón en horno rotatorio	20
2.2.3. Balance de energía para el gas	22
2.2.4. Balance de energía para el sólido.....	23
2.2.5. Balance de energía para la pared.....	24
2.2.6. Variación del sólido por la reacción química.....	26
2.2.7. Balance de masa para la variación de humedad del carbón	26
2.2.8. Balance de masa para el carbón	27
2.2.9. Balance de masa para el gas	27

Índice

2.2.10. Determinación de los coeficientes de transferencia de calor	27
2.3. Descripción de la aplicación GUI para la modelación del proceso de Activación de carbón	28
2.4. Método de solución	31
2.4.1. Método de Runge-Kutta 4to orden.....	32
2.4.2. Algoritmo en pseudo código para RK4	33
2.4.3. Algoritmo de solución en MatLab para.....	33
2.5. Descripción del diseño de experimento para la simulación	34
2.6. Conclusiones del capítulo.....	36
CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN LA SIMULACIÓN DEL PROCESO DE ACTIVACIÓN DE CARBÓN.....	37
3.1. Introducción.....	37
3.2. Principales resultados	37
3.3. Análisis de los resultados	38
3.3.1. Influencia de la temperatura en el proceso de activación de carbón	39
3.3.2. Influencia de la variación del flujo de carbón	41
3.3.3. Influencia del flujo de gases en el proceso	43
3.3.4. Influencia del flujo de vapor en el interior del horno	45
3.4. Valoración económica	47
3.5. Principales problemas ambientales detectados en la planta	48
3.6. Conclusiones del capítulo.....	49
Conclusiones generales.....	50
Recomendaciones.....	51
Bibliografía.....	52

Introducción

El carbón activado es un material poroso, derivado del carbón, preparado por la carbonización y activación de materiales orgánicos, especialmente de origen vegetal, (hullas, lignitos y turbas), con el fin de obtener un alto grado de porosidad y una importante superficie intraparticular. La elevada superficie específica facilita la adsorción física de gases y vapores de mezclas gaseosas o sustancias dispersas en líquidos (Monografias.com). Debido a estas propiedades tiene una amplia gama de aplicaciones, tanto en polvo como granular, para la limpieza de flujos gaseosos o líquidos. En la adsorción en fase gaseosa se emplean para la purificación de aire industrial y residencial, en automóviles para la adsorción de vapores de gasolina, en la recuperación de solventes, en la adsorción de SO₂ y NO_x, en filtros de cigarrillos y en máscaras de gas. Para la adsorción en fase líquida se emplean en los tratamientos de agua potable y residual, en el procesamiento de comidas y bebidas, en la industria farmacéutica y en la industria minera, en la recuperación de oro y otros minerales (Gómez, 2004).

Industrialmente se producen a través varios métodos, mediante la activación física o por medio de la adición de químicos (Gómez, 2004). La más común es la activación física o también conocida como activación térmica, en el cual el producto carbonizado desarrolla una estructura porosa a nivel nanométrico con una gran área superficial, debido al tratamiento térmico y la acción de un agente activante. Estos procesos son llevados a cabo, habitualmente, en hornos en presencia de gases oxidantes como el vapor de agua, aire, ozono o dióxido de carbono (CO₂) (Bah, 2012).

Cuba desde 1998 cuenta con una fábrica de carbón activado ubicada en Guantánamo, en el municipio de Baracoa, la única de su tipo en el país y el Caribe. La fábrica está diseñada para producir carbón activado mediante el método térmico en un horno cilíndrico horizontal rotatorio con una capacidad de producción entre 600 y 700 toneladas al año.

En la referida empresa se han realizado labores de reparación e inversión para mejorar y elaborar un producto altamente competitivo en el mercado internacional. Sin embargo, en sus más de dos décadas de existencia, la fábrica no ha cumplido el plan establecido debido a la inestabilidad y la ineficiencia del proceso (Toledano, 2010).

Situación problemática

Además de lo antes mencionado, se le puede añadir, que en la fábrica de carbón activado existen otras deficiencias debido a la explotación continua y el deterioro de la instalación las cuales se enumeran a continuación:

- No se garantiza el perfil térmico en el interior del horno.
- Se desconoce el flujo de vapor que se suministra al horno de activación.
- Elevado consumo de combustible durante el proceso de activación.
- Baja eficiencia en el proceso de activación del carbón.
- Se desconocen las interrelaciones entre las variables que intervienen en el proceso de activación como la temperatura y el flujo de carbón, de vapor y de gases producto de la combustión y el tiempo de residencia del carbón en el horno.
- Desconocimiento de los valores óptimos de los parámetros de temperatura, flujo, tiempo de retención y velocidad de rotación que garantizan la explotación eficiente de la instalación.

A partir de la situación problemática planteada se define como **problema a resolver** en esta investigación:

La baja eficiencia del proceso de activación de carbón vegetal en el horno horizontal rotatorio de la fábrica de carbón activado de Baracoa.

Para ello se define como **objeto de estudio**: el horno cilíndrico rotatorio para la activación del carbón.

Por tales motivos se plantea como **objetivo general** de la presente investigación:

Simular mediante una aplicación informática el proceso de activación de carbón vegetal en un horno cilíndrico horizontal rotatorio perteneciente a la fábrica de carbón activado en Baracoa y determinar los parámetros de operación óptimos de flujo de carbón, gases de la combustión, vapor de agua y temperatura de los gases que garanticen una mayor eficiencia del proceso.

Y su **campo de acción**: simulación numérica de los procesos de transferencia de calor y masa en hornos cilindros horizontales rotatorios.

Sobre la base del problema a resolver se formula la siguiente **hipótesis**:

Si se realiza un diseño de experimento que relacione las principales variables que intervienen en el proceso de activación de carbón vegetal en el objeto de estudio para la

Introducción

simulación del mismo, entonces se podrían determinar los valores óptimos de operación que garanticen una mayor eficiencia térmica y productiva de la instalación.

En correspondencia con la hipótesis planteada, se definen como **objetivos específicos**:

- Analizar las principales variables que intervienen en el proceso de activación de carbón
- Simular el proceso de activación de carbón vegetal teniendo en cuenta los parámetros de operación del proceso como el flujo de carbón, gases de la combustión, vapor de agua y temperatura del gas.

Para lograr el cumplimiento del objetivo propuesto, se plantean las siguientes **tareas del trabajo**.

- 1- Sistematización de los conocimientos sobre los procesos de obtención de carbón activado y los modelos que lo describen.
- 2- Caracterización de las principales variables que intervienen en el proceso de activación del carbón.
- 3- Planteamiento diseño de experimento para las simulaciones aplicando las herramientas de modelación y simulación.
- 4- Analizar resultados y hacer un análisis del impacto medio ambiental y económico de este proceso.

CAPÍTULO 1: MARCO TEÓRICO E INVESTIGATIVO DEL PROCESO DE ACTIVACIÓN DE CARBÓN

1.1. Introducción

El surgimiento y desarrollo del carbón activo ha sido de vital importancia en la industria, dado que las características de su estructura los hace materiales cuyas propiedades pueden ser transformadas y vislumbren un amplio espectro de aplicaciones en procesos que incluyen desde la recuperación de productos hasta la protección medioambiental.

Este capítulo tiene como objetivo principal exponer los principales fundamentos teóricos y contextuales entrelazados con el proceso de activación de carbón y los principales detalles de los procesos de transferencia de calor y de masa vigentes en el objeto de estudio, así como en otros equipos semejantes.

1.2. Generalidades del proceso de activación del carbón

El carbón activo es un término genérico que describe una familia de absorbentes carbonáceos altamente cristalinos y una estructura porosa interna extensivamente desarrollada. Es de color negro, con diversos grados de dureza, inflamable, con alta capacidad de absorber gases. Es el absorbente por excelencia y se aplica a aquellos procesos en los cuales es necesario separar sustancias inertes de un contaminante.

En cuanto a su producción los carbones activados deben obtenerse de una materia prima con propiedades bien definidas como pueden ser la abundancia del material, la dureza, el alto contenido de carbono y el bajo contenido de ceniza (Bastidas *et al*, 2009).

1.2.1. Materiales empleados para la fabricación de carbones activados

Prácticamente cualquier material orgánico con proporciones relativamente altas de carbono es susceptible de ser transformado en carbón activado. Los carbones activados obtenidos industrialmente pueden provenir de madera y residuos forestales u otros tipos de biomasa, turba, lignito y otros carbones minerales, así como de diferentes polímeros y fibras naturales o sintéticas. No obstante existen algunas limitaciones para la selección o el uso de materiales para la producción de carbón activado. En primer lugar, desde un punto de vista estructural, los carbones activados son carbones muy desordenados e isótropos. Por tanto, no serán adecuados para preparar carbones activados aquellos materiales carbonosos que

Capítulo 1

pasen por un estado fluido o pseudo-fluido durante su carbonización; dado que durante la resolidificación de esta fase suelen formarse estructuras ordenadas en los carbones resultantes. Tampoco resultan adecuados los carbones coquizables, salvo que se eliminen sus propiedades coquizantes, mediante una oxidación previa. Del mismo modo, tampoco resultan adecuados los residuos termoplásticos (espaciovarsavsky.com, 2011).

Los factores que hay que tener en cuenta para elegir un precursor adecuado son: buena disponibilidad y bajo coste, bajo contenido en materia mineral y que el carbón resultante posea unas buenas propiedades mecánicas y capacidad de adsorción. Los residuos de madera, las cáscaras de coco y frutos secos, así como las semillas de algunas frutas junto con los carbones minerales y el coque de petróleo, son los precursores más usados. De este modo, se reconoce que Cuba cuenta con suficientes recursos para implementar tecnologías en el país para producir carbón activado con costos y calidad competitiva frente a un producto importado (espaciovarsavsky.com, 2011).

Teniendo en cuenta que el tipo de material y las propiedades de este es importante para la obtención de carbón activado Builes (2004) realizó estudios sobre la selección de un método para la obtención de carbón activado a partir de cuatro especies forestales, para ello se utilizaron tres hornos verticales cilíndricos marca OVELMA, de 220 V y 800 W de potencia cada uno, de una pulgada de diámetro interno y 45 cm de largo. Los tres tenían la misma configuración para pruebas paralelas, donde eran introducidas las probetas de madera dentro de un porta-muestra de acero inoxidable 316 de ½ pulgada de diámetro interno y con acoples para la entrada de gas; en este caso el gas activante es CO₂ o CO₂ saturado con agua y para las activaciones químicas se hacía pasar N₂ como gas inerte. El tren de recorrido de los gases, que partían de cilindros, uno de 25 kg para CO₂ y otro de 6,5 m³ de N₂, pasaba a través de un horno que contenía viruta de cobre para eliminar las posibles trazas de oxígeno en los gases. Cada horno contaba con medidores de flujos y un sistema de saturación que constaba de un termóstato en cuyo interior había tres burbujeadores (para cada horno) en los cuales se saturaba el CO₂ con vapor de agua a 75°C (para el caso de activación física o química con esta combinación activante).

1.2.2. Equipos para la obtención de carbón activado

Actualmente se evalúan diferentes tecnologías y equipos para obtener carbones activados como el uso de hornos rotatorios. Estos son usados desde hace 50 años en las industrias, de alimentos, de construcción, metalúrgica y otros. Sin embargo, su uso más común es para la incineración de residuos peligrosos, debido a sus altas temperaturas de trabajo (1200 a 1700 °C) y tiempos de residencias (50 a 70 min). Aun cuando los hornos rotatorios son ampliamente usados en la industria química, poca literatura hace referencia de su uso para la obtención de carbón activado. Los datos de uso encontrados son hornos para cargas pequeñas a nivel de laboratorio.

Un horno rotatorio consiste en un cilindro que rota alrededor de un eje longitudinal que gira a muy baja velocidad y opera esencialmente como un intercambiador de calor. En el interior está cubierto con refractarios y su diámetro varía entre 3,6 y 6,0 m teniendo una longitud que va entre 50,0 y 125,0 m . El cilindro está ligeramente inclinado (pendiente de 2 a 6%) para facilitar el desplazamiento axial del lecho sólido, el cual se mueve hacia el final del tubo en la descarga, y los gases circulan en contra corriente (Mellmann y Col., 2004).

El uso de hornos como el horizontal, vertical o rotatorio muestra numerosas ventajas en la activación, tales como: un calentamiento directo, una operación continua por la escala del proceso, altos flujos de materia prima y además el uso de gas combustible como fuente de energía sin problemas de seguridad (alto riesgo de explosión) como lo presentan otras tecnologías; adicionalmente, una vez el horno alcanza condiciones de estado estacionario, el suministro de gas combustible puede ser reducido ya que la combustión de los volátiles y/o productos gaseosos pueden proporcionar el calor lo cual da la posibilidad de producción de carbón activado a costos competitivos en el mercado (Chalarca, 2013).

El horno Casamance consiste en una parva de tierra a la que se le ha añadido una chimenea, en cuya base se coloca un recipiente o se hace un hueco en el suelo para recoger los condensados. El encendido se realiza en la parte más alta de la parva (en su centro aproximadamente). Una vez encendida la madera, se deja pasar de 20 minutos a una hora hasta que se asegure que la madera arde y la parva tiene tiro. La chimenea suele estar construida con bidones vacíos de gasolina o gasoil y está unida mediante un tubo a la parte inferior de la parva. La ventaja de este es que no requiere ningún desembolso económico,

ni al comienzo del proceso ni durante el transcurso del mismo porque son utilizados como recursos materiales los que nos proporciona nuestra naturaleza y es una manera sencilla de producir carbón (Sevilla, 2002).

1.2.3. Métodos de fabricación de carbón activado

Para obtener carbones activados con características especiales en área superficial, microporosidad y rendimiento es de gran importancia no solo la tecnología empleada sino también los métodos de activación. Estos métodos pueden dividirse en dos procesos de activación diferentes:

Activación térmica:

La activación térmica, también conocida como activación física, a pesar de que esta se produce por las reacciones químicas del agente activante con el carbono del material que está siendo activado consta de dos etapas: la carbonización y la activación. En ocasiones para la obtención de carbón activado con determinadas características es necesarios ciertos pretratamientos como: la molienda y el tamizado para obtener un tamaño adecuado del precursor. Si el precursor es un carbón coquizable será necesario entonces una etapa de oxidación para eliminar las propiedades coquizables. En otras circunstancias el material de partida es molido hasta formar un fino polvo, después compactado con algún aglomerante en forma de briquetas y luego vuelto a moler hasta obtener el tamaño deseado. De esta forma se consigue una mejor difusión del agente activante y por tanto una mejor porosidad en el carbón activado resultante. Otra etapa previa a la activación propiamente dicha es la carbonización, en la cual el precursor es sometido a elevadas temperaturas (del orden de los 800°C) en ausencia de aire, para eliminar las sustancias volátiles y dejar un residuo carbonoso que será el que se someta a la activación. Durante la desvolatilización, la salida de los gases y vapores del precursor produce una porosidad “incipiente” en el carbonizado, la cual se desarrolla aún más durante la etapa de activación. La activación propiamente dicha puede ser un proceso totalmente independiente de la carbonización o llevarse a cabo a continuación de ésta. Consiste en hacer reaccionar al agente activante con los átomos de carbono del carbonizado que está siendo activado; de forma que se produzca un “quemado selectivo” que va horadado progresivamente al carbonizado, generando poros y aumentando la porosidad hasta transformarlo en un carbón activado. Los agentes activantes

Capítulo 1

que se suelen usar son: oxígeno (raramente a escala industrial) aire, vapor de agua (el más usado) y CO₂. Estos agentes dan lugar reacciones químicas, que se muestran en las ecuaciones (1.1, 1.2, 1.3, 1.4), que eliminan átomos de carbono produciendo así la porosidad, (espaciovarsavsky.com, 2011).



Activation química:

La activación química, este tipo de activación el precursor se hace reaccionar con un agente químico activante. En este caso la activación suele tener lugar en una única etapa a temperaturas que pueden variar entre 450 y 900°C. No obstante, en este tipo de activación, es necesaria una etapa posterior de lavado del carbón activado para eliminar los restos del agente activante. Existen numerosos compuestos que podrían ser usados como agentes activantes, sin embargo, los más usados industrialmente son el cloruro de zinc (ZnCl₂), el ácido fosfórico (H₃PO₂) y el hidróxido de potasio (KOH). La activación química con ZnCl₂ fue el método más usado hasta 1970, especialmente para la activación de residuos de madera. Sin embargo, su uso se ha restringido mucho en la actualidad debido a los problemas medioambientales que conlleva el uso del ZnCl₂. No obstante algunos países como China aún siguen usando este método para producir carbón activado. La activación química con H₂ PO₂ prácticamente ha desplazado al ZnCl₂ y los precursores en este tipo de activación son en su mayoría, como en el caso de ZnCl₂, residuos forestales (madera, cáscara de coco, hueso de aceituna, etc.) La activación con H₃PO₄ implica las siguientes etapas: (i) molienda y clasificación del material de partida, (ii) mezcla del precursor con H₃PO₄ (reciclado y fresco), (iii) tratamiento térmico en atmósfera inerte entre 100 y 200°C, manteniendo la temperatura aproximadamente 1h, seguido de un nuevo tratamiento térmico hasta 400 – 500°C, manteniendo esta temperatura en torno a 1h, (iv) lavado, secado y clasificación del carbón activado, y reciclado del H₃PO₄. La proporción H₃PO₄: precursor

más empleada suele ser 1:5 (aunque proporciones diferentes dan lugar a carbones con distintas propiedades), el rendimiento en carbón activado suele ser del 50%. La activación química con KOH se desarrolló durante los años 70, para producir los denominados “carbones superactivados”, con superficies específicas del orden de los 3000 m²/g . A diferencia de los otros dos agentes activantes, los precursores preferibles par la activación con KOH son aquellos de bajo contenido en volátiles y alto contenido en carbono, como los carbones minerales de alto rango, carbonizados y coque de petróleo. En esta activación el KOH se mezcla con el precursor, en una suspensión acuosa o mediante una simple mezcla física, en proporciones KOH: precursor entre 2:1 y 4:1. Cuando la impregnación tiene lugar en medio acuoso, la activación se lleva a cabo en dos tratamientos térmicos consecutivos en atmósfera inerte. El primero a temperaturas bajas, pero superiores a los 200°C (que se utiliza solo para evaporar el agua y dispersar el KOH) y el segundo entre 700 y 900°C . En el caso de una mezcla física no es necesario llevar a cabo el primer tratamiento. (espaciovarsavsky.com, 2011).

1.2.4. Clasificación del carbón activado

Los carbones activos pueden clasificarse atendiendo al tamaño de las partículas en carbón activado en polvo (CAP) y carbón activado granular (CAG). Los CAP presentan tamaños menores de 100 μ m, siendo los tamaños típicos entre 15 y 25 μ m . Los CAG presentan un tamaño medio de partícula entre 1 y 5 mm . Los CAG se dividen en dos clases:

1. Carbón activado sin forma.
2. Carbón activado con forma específica.

Los carbones sin forma se obtienen por molienda, tamizado y clasificación de trozos más grandes. Los carbones conformados se pueden obtener por extrusión de carbón en polvo luego de ser mezclado con diferentes tipos de aglomerantes. Existen otras formas de carbón, como las fibras, las telas y los filtros de carbón activado y las membranas de carbón, (Menéndez, 2006).



Figura 1.1. Tipos de carbón activado.

1.3. Flujo tecnológico

La fábrica de carbón activado ubicada en Guantánamo en el municipio de Baracoa, para la producción de dicho producto, cuenta con una instalación que depende de cinco áreas fundamentales, las cuales se mencionan a continuación:

- Área de recepción y pesaje de la materia prima.
- Área de trituración y clasificación primaria.
- Área de activación.
- Área de clasificación secundaria y envase.
- Área de caldera, depuración y extracción de gases.

Área de recepción y pesaje de las materias primas:

En esta área se recibe y se pesan las materias primas fundamentales de la fábrica (carbón vegetal obtenido de madera dura y carbón primario de conchas de coco), constituye el primer punto de muestreo.

Área de trituración y clasificación primaria:

Esta etapa comprende la trituración primaria y clasificación de las materias primas hasta alcanzar la granulometría óptima para el proceso de activación, esta se vierte a una tolva,

Capítulo 1

en el cual hay un desterronador que le reducen el tamaño hasta aproximadamente 10 a 40 mm luego pasa a un transportador sinfín que lo vierte a un elevador de cubo de 18 m este lo vierte a un conjunto de dos molinos que se encargan de reducir hasta 2 a 10 mm, luego pasa a una zaranda de un paño que hace la primera clasificación, las fracciones que rechaza esta, pasan a un tercer molino, el producto que pasa por la zaranda de un paño y el del tercer molino pasa entonces a la zaranda de tres paño que separa el producto terminado las granulometrías de trabajo y el polvo residual que es depositado en dos silos.

En esta área funciona un sistema de extracción de polvo con un ventilador extractor que tiene toma en los molinos, las zarandas, el elevador y los silos, eliminando así el polvo generado por el proceso de molienda y clasificación.

Área de activación:

En el área de activación es donde se realiza la operación fundamental de la planta y se define la calidad del producto final y el rendimiento de la misma.

El proceso de activación se realiza en un horno cilíndrico rotatorio a través del método térmico y empleando como agente activante vapor de agua con las siguientes características: temperatura de 170°C a 180°C y 8 atm de presión.

Para suplir la energía requerida en el proceso se suministran al interior del horno los gases productos de la combustión generados en la cámara de combustión y suministrado al horno a temperaturas que oscilan entre los 850 a 1000 °C .

El carbón activado sale del horno por medio de un serpentín enfriador de descarga que rodea la superficie exterior final del horno y descargados a un sinfín enfriador (de 138 mm de diámetro x 2600 mm de largo) abierto al aire por la parte superior y provisto de una camisa de enfriamiento por agua en la parte inferior. El producto frío se descarga en un elevador de cubos de 8 m de alto que lo eleva a un silo de 5 m³ de capacidad donde se almacena el carbón activado que sale del horno, ante de pasar a la etapa siguiente para su clasificación granulométrica y envase.

Área de Clasificación secundaria y envase:

El carbón activado almacenado en el silo se alimenta a una zaranda circular de dos paños por medio de una válvula de estrella de 198 mm de diámetro. En esta zaranda se obtienen tres fracciones que son: +1,58 mm; -1,58 mm + 0,5 mm; -0,5 mm .

Estas tres fracciones serán envasadas independientemente en sacos multicapas. Cada saco llevara 10 kg de carbón activado.

En esta área existen tomas para la extracción de polvo en las zonas siguientes:

- Zona de descarga del elevador al silo.
- Zona de la zaranda circular.
- Zona de envase de las fracciones.

El flujo de aire y polvo extraído van a un filtro de mangas ($A= 6,4 \text{ m}^2$) acoplado a un sistema que cuenta con un compresor (320 L / min.) para descargar las mangas periódicamente. El aire libre de polvo se expulsa a la atmósfera por medio de un ventilador extractor de 2000 m^3 .

Área de caldera, depuración y extracción de gases:

El vapor de agua requerido para la activación, se genera en una caldera compacta de tubos de fuego ubicada en un local anexo a la nave del horno, dicha caldera opera automáticamente arrancando y parando entre dos límites de presión prefijados (6 a 8 kg/cm^2) siendo la secuencia de arranque programada automáticamente.

La caldera cuenta con una serie de equipos auxiliares para su operación normal tales como: bombas de alimentación de agua, tanque de almacenamiento de agua y un sistema de tratamiento de agua simple con un intercambiador iónico y un tanque de regeneración con salmuera.

Una vez transferido el calor de los gases en la caldera, los mismos se pasan a través de un ciclón lavador para eliminar el polvo y luego son expulsados a la atmósfera empleando un extractor con una capacidad de 8000 m^3 / h .

1.4. Descripción de la instalación

La instalación utilizada en el proceso de activación de carbón es un horno horizontal cilíndrico rotatorio de aproximadamente 12 m de longitud y 1,6 m de diámetro, con 15° de ángulo de inclinación con respecto a la horizontal para posibilitar que el material se mezcle y se transporte con más rapidez. Este consta con 4 toberas equidistantes colocados a lo largo, mediante las cuales circula y se distribuye el aire necesario para la combustión de los gases, además posee un quemador de gas oil automático que se acopla a la cámara de combustión para facilitar el precalentamiento inicial del horno y evitar la disminución repentina de la temperatura durante el proceso. El cilindro, en su interior, posee una serie de aletas soldadas con una ligera inclinación con respecto al eje del mismo, responsables de elevar, voltear y desplazar el material dentro de la corriente gaseosa facilitando el contacto sólido-gas, lo que permite un proceso de evaporación más eficiente. Dentro de la instalación el gas circula en el mismo sentido que el carbón. El carbón activado sale por medio de un serpentín enfriador de descarga que se encuentra al final del horno en su superficie exterior. Además, posee un sistema automatizado que registra el comportamiento de una serie de parámetros de importancia en el proceso con sus instrumentos de medición y sus características técnicas (Zalazar *et al*; 2016).

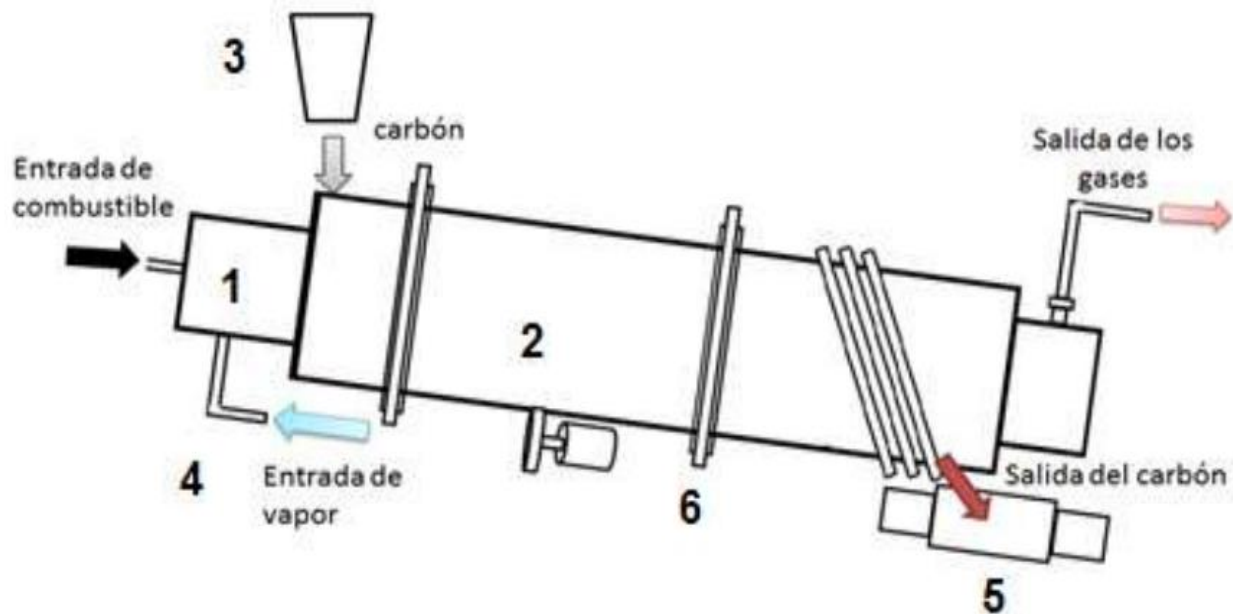


Figura 1.2-Horno de activación del carbón.

1.5. Procesos que intervienen en la activación del carbón en el objeto de estudio

Análisis de los procesos de transferencia de calor en el horno cilíndrico horizontal rotatorio:

El proceso de activación térmica con vapor de agua generalmente se realiza en el interior de un horno cilíndrico horizontal rotatorio, donde el carbón es sometido a altas temperaturas en una atmósfera inerte o reductora, saturada con vapor de agua. En esas condiciones, los átomos de carbón reaccionan y se gasifican en forma de CO_2 , y otros se recombinan y condensan en forma de placas grafiticas.

En dicho proceso están presentes las reacciones químicas para la activación y los fenómenos de transferencia de calor y masa (Cangialosi, 2006).

i) La transferencia de masa ocurre por dos vías, la primera está dada por la evaporación de la humedad contenida en el carbón y la segunda se produce por las reacciones químicas que se generan entre el carbón el vapor de agua (figura 1.3a) (Kim, 2012);(Ortiz, Martínez, et al., 2003);(Castaño, Rubio, Ortega, 2009);(Cataño, 2003).

ii) La transferencia de calor en el horno para la activación se describe en tres zonas (ver figura 1.2b). La zona en donde se encuentran: los gases producto de la combustión (zona 1), la zona que corresponde a la transferencia de calor en el carbón (zona 2) y la zona de la pared del cilindro que incluye la transferencia de calor en la parte cubierta por el carbón, la no cubierta y la pared exterior (zona 3) (Góngora-Leyva, 2008; Góngora-Leyva, 2004; Góngora-Leyva, 2006; Pujol-Leyva, 2007; Gorog, 1982).

La figura 1.3 b) representa un corte del horno para la activación del carbón mostrando el sistema formado por los gases producto de la combustión y el vapor de agua saturada, donde Q_1 es el calor transferido por convección y radiación de los gases y el vapor de agua a la superficie del carbón, Q_2 es calor transferido por convección y radiación del gas y el vapor a la pared no cubierta por el carbón. El calor absorbido por el carbón (Q_3), generalmente, está dado por la convección, radiación y conducción. Según Ortiz *et al.* (2003) y Kim (2012) el carbón para la activación en el interior de un horno cilíndrico rotatorio se comporta como un fluido por lo que proponen determinar la transferencia de calor de la pared que está en contacto con el sólido a través de la convección. Q_4 es el calor transferido por conducción de la pared interior al exterior y la convección y radiación de la pared exterior al ambiente.

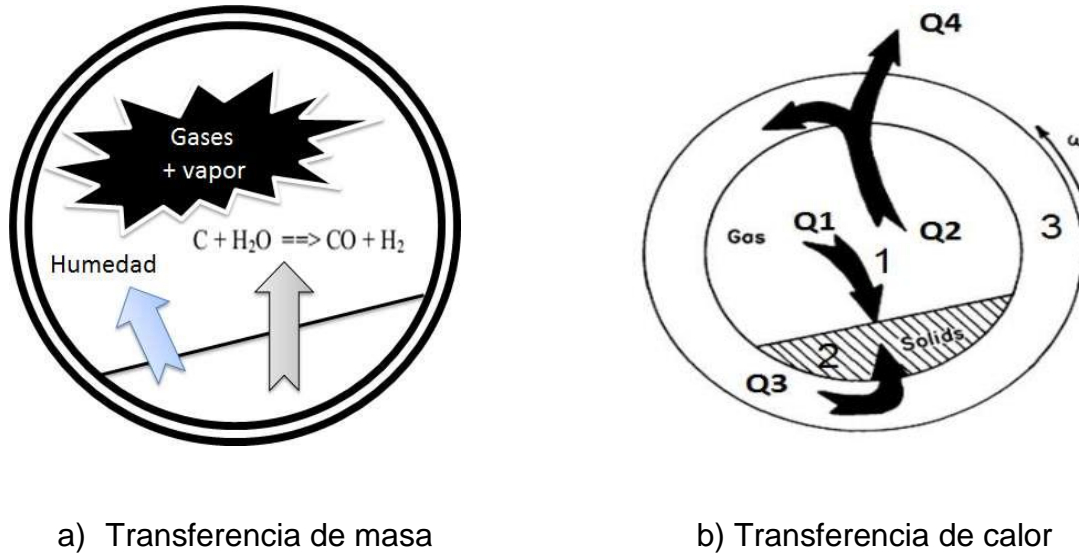


Figura 1.3. Corte trasversal del horno para la activación

1.5.1. Transferencia de calor del sólido a la pared cubierta

La transferencia entre sólido ocurre mediante la conducción y en la literatura especializada se pueden encontrar numerosas ecuaciones para determinar los coeficientes que caractericen dicho proceso en hornos cilíndricos (Wes, 1976; Techeng, 1979; Lehmborg, 1997; Wachters, 1964; Ferron, 1991; Agustini, 2006). Sin embargo la ecuación 1.5 determina la transferencia de calor entre el sólido y la pared cubierta en un horno cilíndrico rotatorio como convección, normalmente el traslado de calor entre dos sólidos ocurre simultáneamente la radiación, convección y conducción; sin embargo Gorog (1982) define a este coeficiente como convección entre el sólido y la superficie cubierta de la pared. Según Kim (2012) debido al movimiento de las partículas del carbón en el horno rotatorio, el mismo, se comporta como un fluido por lo que se asumió que la transferencia de calor entre la pared y el sólido está caracterizado por la convección. De igual manera Ortiz *et al.* (2003) determina la transferencia de calor entre la pared y el sólido a partir de las ecuaciones que caracterizan la convección de un fluido en el interior de un cilindro anular.

$$h_w = \frac{11,6 \cdot k_s}{D \cdot \beta} \cdot \left(\frac{\omega \cdot R_i^2 \cdot \beta}{30 \cdot K_s} \right)^{0,3} \quad (1.5)$$

Donde:

Capítulo 1

h_w : Coeficiente de transferencia de calor por convección; $W/(m^2 \cdot K)$

k_s : Conductividad térmica del sólido; $W/(m \cdot K)$

ω : Velocidad de rotación del cilindro; s^{-1}

D : Diámetro del cilindro; m

R_i : Radio interior del cilindro; m

K_s : Difusividad térmica; m^2/s

β : Ángulo medio formado por el carbón con respecto carbón; rad

1.5.2. Transferencia de calor por convección del gas a la pared no cubierta por el sólido

La transferencia de calor por convección en el interior de un horno cilíndrico incluye dos partes: la transferencia de calor de la mezcla de gases con la superficie de la pared no cubierta por el carbón y la transferencia de calor de los gases a la parte superior del carbón (Agustini, 2006; Agustini, 2007; Agustini, 2005).

La ecuación 1.6 fue obtenida por (Sass, 1967) y (Riffaud, 1972) mediante las correlaciones aplicadas al flujo másico de un gas en el interior de una tubería para determina la transferencia de calor por convección.

$$h_{gw} = 0,0981 \cdot (G_g)^{0,67} \quad (1.6)$$

Donde:

h_{gw} : Coeficiente de transferencia de calor por convección del gas a la pared en el interior del cilindro; $W/(m^2 \cdot K)$

G_g : Flujo másico de gases que cruzan la sección transversal del cilindro; $kg/(h \cdot m^2)$

Watkinson y Brimacombe (1978) a través del análisis de los datos experimentales obtenidos en un horno a escala piloto, para un rango de temperatura superior a 700 K, determinaron la ecuación 1.7 que caracteriza la convección del gas a la pared.

$$Nu_{gw} = 1,26 \cdot \left(Re_D \cdot Pr \cdot \frac{D}{2 \cdot L} \right)^{0,43} \quad (1.7)$$

Nu_{gw} : Número del Nusselt; adimensional

Re_g : Número del Reynolds para el gas; adimensional

Pr : Número del Prandals; adimensional

L : Largo del cilindro; m

Tscheng y Watkinson (1979) obtuvieron la ecuación 1.8 la cual no incluye la radiación del gas pero si tienen en cuenta la velocidad de rotación, el flujo de gas y el coeficiente de llenando. Válida para los rango de Reynolds (Re) $7800 > Re > 1600$ y $800 > Re_\omega > 20$.

$$Nu_{gw} = 1,54 \cdot Re_g^{0,575} \cdot Re_\omega^{0,292} \quad (1.8)$$

Re_ω : Número del Reynolds rotacional; adimensional

1.5.3. Convección del gas a la superficie expuesta del sólido

Algunos investigadores (Riffaud, 1972; Sass, 1967) han empleado la ecuación (1.6) para la transmisión de calor del gas a la pared y el flujo de calor del gas a la superficie del sólido los cuales consideran que este coeficiente es independiente de la velocidad de rotación, dimensiones de las partículas, e inclinación del horno. Otros emplean la 1.9 (Incropera, 2007) que fue obtenida para el interior de cilindros no giratorios.

$$h_{gs} = 0,023 \cdot \frac{k_g}{D} \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \quad (1.9)$$

Donde:

h_{gs} : Coeficiente de transferencia calor por convección de gas al carbón; $W/(m^2 \cdot K)$

k_g : Conductividad térmica del gas; $W/(m \cdot K)$

A pesar de que estas ecuaciones (1.6 y 1.9) han sido empleadas para el análisis de hornos cilíndricos rotatorios no es muy conveniente su aplicación en el objeto de estudio de la presente investigación. Por otro lado el estudio experimental informado por Tscheng y

Watkinson (1979) el cual se considera el más completo realizado hasta la fecha obteniéndose la ecuación 1.10 a través de la experimentación:

$$Nu_{gs} = h_{gs} \cdot \frac{De}{k_g} = 0,46 \cdot Re_g^{0,535} \cdot Re_\omega^{0,104} \cdot f^{-0,341} \quad (1.10)$$

$$Re_\omega = \frac{\omega \cdot De^2}{\nu} \quad (1.11)$$

$$Re_g = \frac{U_\infty \cdot De}{\nu} \quad (1.12)$$

Donde: De es el diámetro equivalente como una función de coeficiente de llenado (f), Re_g y Re_ω ; Re_ω son los números de Reynols correspondientes para el flujo de gas y para velocidad de rotación del cilindro.

1.5.4. La transferencia de calor por radiación

La determinación de la radiación depende de varios parámetros y características como el diámetro del horno, concentración de los gases producto de la combustión, el polvo, el hollín, la emisividad del gas y de la pared.

La emisividad del gas en un horno rotatorio depende de la concentración de vapor de agua, CO_2 , CO , y CH_4 . En el caso de la mezcla de gases como H_2O+CO_2 , la emisividad del gas pueden calcularse a través de la ecuación 1.13 (Agustini, 2006).

$$\varepsilon_g = \varepsilon_{CO_2} + \varepsilon_{H_2O} + \Delta\varepsilon \quad (1.13)$$

Donde

ε_g : Emisividad de la mezcla de gases; adimensional

ε_{CO_2} : Emisividad del dióxido de carbono; adimensional

ε_{H_2O} : Emisividad del agua; adimensional

$\Delta\varepsilon$: Coeficiente de corrección de la emisividad de la mezcla de gases; adimensional

Entre los modelos desarrollados para la obtención de la radiación en el interior de un horno rotatorio es importante referenciar los realizados por Barr (1986) y Gorog (1982) en los

cuales se da una descripción detallada de la transferencia de calor entre el gas, el sólido y la pared empleando el método de la n-zona.

1.6. Conclusiones del capítulo

1. Se realizó una revisión bibliográfica sobre los principales aspectos que se deben tener en cuenta en el proceso de activación de carbón.
2. Se describió las principales características del carbón activo y el objeto de estudio.
3. Se abordaron los fundamentos teóricos de la transferencia de calor y de masa en hornos horizontales rotatorios.

CAPÍTULO 2. PROCEDIMIENTOS PARA LA MODELACIÓN Y SIMULACIÓN DEL PROCESO DE ACTIVACIÓN DE CARBÓN

2.1. Introducción

La modelación matemática es un instrumento necesario en el diseño y operación de una planta o de un proceso de producción de carbón activado, ya que permite obtener soluciones a través de métodos numéricos con exactitud y rapidez. Para combinar las ecuaciones que describen un objeto en la industria, es necesario despreocuparse de una serie de factores secundarios y sí tener en cuenta los principales como las variables de entrada, de salida y las perturbaciones que influyen en la dinámica del mismo; además la sencillez del modelo conformado debe contener las principales peculiaridades del proceso investigado (Guzmán, 2001).

La simulación es el proceso de diseñar un modelo de un sistema real y llevar a término experiencias con él, con la finalidad de comprender el comportamiento del sistema o evaluar nuevas estrategias dentro de los límites impuestos por un cierto criterio o un conjunto de ellos para el funcionamiento del sistema (Shannon & Johannes, 1976).

A partir del conocimiento de los factores que influyen en la transferencia de calor y los modelos que describen el comportamiento de la variación de masa y energía que ocurren en el horno para la activación de carbón se pueden establecer simulaciones teóricas que permitan variar los parámetros óptimos de trabajo dentro del proceso y con ello hacer comparaciones para lograr una mayor eficiencia de la instalación.

Por lo anteriormente expuesto en el presente capítulo se tienen como objetivos:

1. Describir el modelo matemático del proceso de activación de carbón y los métodos de solución del mismo.
2. Establecer los procedimientos para la simulación del proceso de activación de carbón mediante una aplicación informática creada en la herramienta Guide del Matlab.

2.2. Modelo matemático para la activación de carbón en horno rotatorio

Para el modelado del proceso de activación de carbón vegetal, en un horno cilíndrico rotatorio, se parte del balance de energía y masa, a través del cual se obtiene un sistema de ecuaciones diferenciales que incluye las reacciones químicas entre el carbón y el vapor

Capítulo 2

de agua. Además, se plantean las ecuaciones que caracterizan a los coeficientes de transferencia de calor y de masa en el interior y el exterior del horno. Este método de modelación ha sido empleado con éxito por diversos investigadores para el análisis de equipos similares como hornos y secadores cilíndricos rotatorios (Kim & Srivastava 1990; Ortiz et al. 2003; Han & Chang 2012). Para la elaboración del modelo se realizan las consideraciones siguientes:

- Los cambios de velocidades para el carbón y el gas, así como las partículas de carbón arrastradas por el gas son despreciables.
- Todas las variables son uniformes en la dirección radial.
- El flujo de vapor y la presión en el horno son constantes.
- La reacción química obedece la Ley de Arrhenius, y las reacciones secundarias no se tienen en cuenta.

Con el objetivo de determinar el gradiente de temperatura y flujo a lo largo del horno de activación, se analiza el cilindro con un número finito de elementos volumétricos dispuestos en serie y se aplicarán a cada elemento ecuaciones de conservación de la energía y masa (Góngora-Leyva, 2014). Cada elemento de volumen está limitado longitudinalmente por dos secciones, llamadas sección de entrada y sección de salida (subíndice $z + dz$) tal como se ilustra en la figura 2.1.

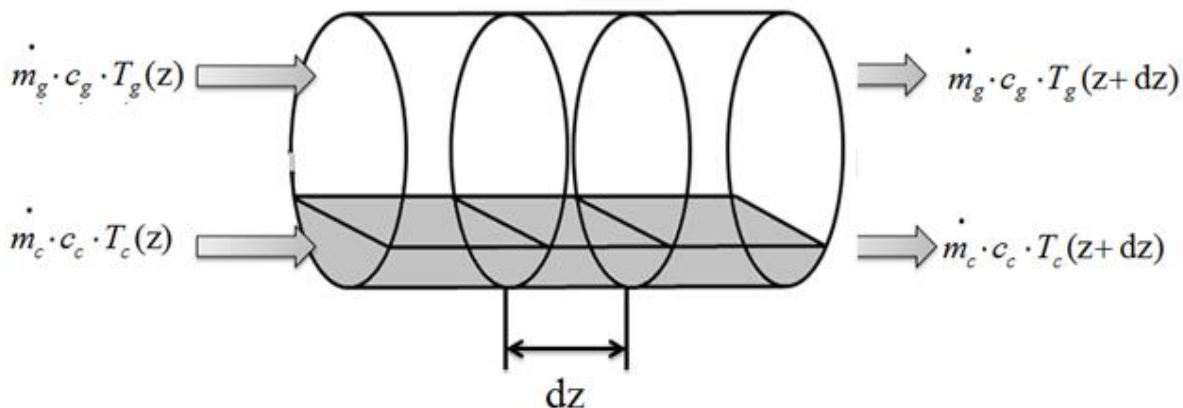


Figura 2.1. Elemento del volumen del cilindro.

Partiendo del análisis de la figura 2.1 se establecen las ecuaciones de balance de energía y masa para el gas, el sólido y la pared del horno de activación las cuales se presentan en los subepígrafos siguientes.

2.2.3. Balance de energía para el gas

La estimación de la distribución de temperatura del gas en el interior del horno se obtiene del balance de energía de los calores que entran y salen (ecuación 2.1).

$$Q_g = -Q_{g-c} - Q_{g-w} + Q_h \quad (2.1)$$

Q_g : Calor de los gases de la combustión; W

Q_{g-c} : Calor cedido del gas al carbón; W

Q_{g-w} : Calor cedido del gas a la pared del cilindro; W

Q_h : Calor requerido para calentar el vapor de agua por encima de la temperatura de ebullición; W

Partiendo de la ecuación (2.1) la variación del calor del gas se determina por la ecuación (2.2). En la ecuación (2.2) el miembro izquierdo determina la variación del flujo de calor a lo largo del cilindro. Los términos de la derecha de la ecuación representan el calor transferido por conducción y radiación del gas al carbón y a la superficie de la pared no cubierta por el carbón más el calor latente de vaporización del agua.

$$\frac{\partial(\dot{m}_g \cdot C_{p_g} \cdot T_g)}{\partial z} = \left(\begin{array}{l} -K_3 \cdot (T_g - T_c) - K_4 \cdot (T_g^4 \cdot \epsilon_g - T_c^4 \cdot A_v) - K_5 \cdot (T_g - T_w) \\ -K_6 \cdot (T_g^4 \cdot \epsilon_g - T_w^4 \cdot A_v) + \frac{\partial \dot{m}_h}{\partial z} \cdot C_{p_v} \cdot (T_c - 373) \end{array} \right) \quad (2.2)$$

Donde:

K_3 : Coeficiente de transferencia de calor variable por unidad de longitud para la convección del gas al sólido; $W/(m \cdot K)$

K_5 : Coeficiente de transferencia de calor variable por unidad de longitud para la convección del gas a la pared; $W/(m \cdot K)$

K_4 : Coeficiente de transferencia de calor variable por unidad de longitud para la radiación del gas al sólido; $W/(m \cdot K^4)$

K_6 : Coeficiente de transferencia de calor variable por unidad de longitud para la radiación del gas a la pared; $W/(m \cdot K^4)$

ε_g : Emisividad del gas; Adimensional

A_v : Adsorción; Adimensional

T_c : Temperatura del carbón; K

T_w : Temperatura de la pared; K

Cp_g : Calor específico del gas; $J/(kg \cdot K)$

Cp_v : Calor específico del vapor de agua; $J/(kg \cdot K)$

2.2.4. Balance de energía para el sólido

La distribución de temperatura en el sólido se determina mediante el mismo procedimiento para el gas, partiendo del balance de energía de los calores que se le añaden y que salen del carbón, de esta manera se formula la siguiente ecuación (2.3).

$$Q_c = Q_{g-c} + Q_{w-c} - Q_h - Q_r \quad (2.3)$$

Donde:

Q_r : Calor para la reacción para la activación; W

Q_c : Calor del carbón; W

Q_{w-c} : Calor transferido de la pared al carbón; W

En este caso el calor del sólido depende del calor transferido por la radiación del gas y la pared, el calor transferido por la convección de los gases y la pared, además del calor de vaporización y el calor empleado para la activación. En tal sentido se define la variación del flujo de calor del carbón por la ecuación 2.5:

$$\frac{\partial(n\dot{m}_c \cdot Cp_c \cdot T_c)}{\partial z} = \left(\begin{array}{l} K_3 \cdot (T_g - T_c) + K_4 \cdot (T_g^4 \cdot \varepsilon_g - T_c^4 \cdot A_v) + K_7 \cdot (T_w - T_c) \\ + K_8 \cdot (T_w^4 \cdot \varepsilon_g - T_c^4 \cdot A_v) - \frac{\partial n\dot{m}_h}{\partial z} \cdot H_v - \frac{\partial n\dot{m}_c}{\partial z} \cdot \Delta H \end{array} \right) \quad (2.5)$$

Donde:

H_v : Calor latente de vaporización; J/kg

ΔH : Calor de la reacción; $kJ/(k \cdot mol)$

T_w : Temperatura de la pared interior del horno; K

K_7 : Coeficiente variable de transferencia de calor por unidad de longitud para la convección entre el sólido y la pared; $W/(m \cdot K)$

K_8 : Coeficiente variable de transferencia de calor por unidad de longitud para la radiación entre la pared - sólido; $W/(m \cdot K^4)$

2.2.5. Balance de energía para la pared

Para resolver las ecuaciones (2.2) y (2.5) es indispensable determinar la temperatura de la pared en el interior. Para ellos se propone determinar la temperatura de la pared en el interior a través del cálculo de la transferencia de calor del interior al exterior considerando el flujo de calor neto; es decir, calor transferido gas-pared, pared interna a la externa y pared externa al ambiente (Gorog, 1982).

Los procesos de transferencia de calor en la pared del cilindro ocurren mediante la transferencia de calor por conducción por la pared del cilindro al exterior y la convección y radiación de la superficie exterior al aire. El calor transferido por la conducción y convección entre la pared cubierta y el carbón no fue considerado porque se considera que la temperatura de la superficie de la pared cubierta por el sólido y el sólido posee la misma temperatura.

La ecuación resultante para la temperatura de la pared interior T_w (2.6) que incluye la temperatura de la pared en el exterior que puede ser determinada por la ecuación (2.7) propuesta por Gorog (1982).

Capítulo 2

$$T_w = \frac{\left[\frac{T_a}{h_i \cdot R_i} + T_g \cdot \left[\frac{1}{\left[1 + \frac{T_a}{T_{wo}} + \left(\frac{T_a}{T_{wo}} \right)^2 + \left(\frac{T_a}{T_{wo}} \right)^3 \right] \cdot \varepsilon_{wo} \cdot \sigma \cdot (T_{wo})^3 + h_o} \right] \cdot R_e - \frac{\ln \frac{R_i}{R_e}}{k_w} \right]}{\frac{1}{h_i \cdot R_i} + \left[\frac{1}{\left[1 + \frac{T_a}{T_{wo}} + \left(\frac{T_a}{T_{wo}} \right)^2 + \left(\frac{T_a}{T_{wo}} \right)^3 \right] \cdot \varepsilon_{wo} \cdot \sigma \cdot (T_{wo})^3 + h_o} \right] \cdot R_e - \frac{\ln \frac{R_i}{R_e}}{k_w}} \quad (2.6)$$

Donde:

R_e : Radio exterior del horno; m

k_w : Conductividad térmica de la pared; $W/(m \cdot K)$

h_i : Coeficiente de transferencia de calor en el interior; $W/(m^2 \cdot K)$

h_o : Coeficiente de transferencia de calor en el exterior; $W/(m^2 \cdot K)$

T_a : Temperatura del ambiente; K

T_{wo} : Temperatura de la pared exterior; K

La temperatura en el exterior del cilindro se puede determinar a través de la ecuación

$$T_{wo} = T_w - \frac{[T_w - T_a]}{0,693 + \frac{k_w}{h_o \cdot R_e}} \quad (2.7)$$

El coeficiente de transferencia de calor del gas a la pared interna del cilindro (h_i) se determina a través de la ecuación (2.8).

$$h_i = h_{gw} + \sigma \cdot \varepsilon_g \cdot \varepsilon_w \cdot (T_g^3 - T_w^3) \quad (2.8)$$

Donde:

h_{gw} : Coeficiente de transferencia de calor por convección del gas a la pared interior; $W/(m^2 \cdot K)$

2.2.6. Variación del sólido por la reacción química

La característica que distingue la activación del carbón por el método físico es que además de los procesos de intercambio térmico y masa también se tiene que tener en cuenta las reacciones químicas que se producen entre el oxígeno y el carbón. Para la modelación solo se tuvo en cuenta la reacción de primer orden (ecuación 1.1) que analiza la reacción del carbón con el vapor de agua (Yehaskel, 1978).

Para determinar la variación de la masa del sólido se propone la ecuación (2.9) planteada por Martínez (Martínez, 1988) obtenida en una instalación experimental bajo condiciones similares al funcionamiento de un horno rotatorio para la activación del carbón. Dicha ecuación es una transformación de la Ley de Arrhenius en la cual se considera que la producción del flujo de vapor es constante.

$$r_s = -\frac{\partial m_c}{\partial z} = \frac{6,005 \left[\exp\left(\frac{-8033}{T_c}\right) \right] \cdot m_v \cdot m_c}{V_c} \quad (2.9)$$

Donde:

r_s : Masa del carbón que reacciona con el vapor de agua; *kg/s*

m_v : Flujo del vapor; *kg/s*

V_c : Velocidad del carbón; *m/s*

2.2.7. Balance de masa para la variación de humedad del carbón

Para determinar la variación de la humedad en el sólido se tienen en cuenta las fases de secado de una sustancia donde la primera fase está gobernada por la evaporación y es considerado que la superficie sólida permanece saturada. En una segunda fase, el proceso de secado (difusión de humedad) dentro de la partícula hacia su superficie (Coulson, 1981). La tercera fase tiene en cuenta la humedad crítica de 10% y suponiendo la continuidad de las dos fases anteriores, la variación de la humedad en sólido en la dirección axial. Partiendo del análisis anterior se formuló la siguiente ecuación (2.10).

$$\frac{\partial \dot{m}_h}{\partial z} = - \frac{h_i \cdot A \cdot (T_g - T_c) \cdot \dot{m}_h}{H_v \cdot (0,1 \cdot \dot{m}_c)} \quad (2.10)$$

2.2.8. Balance de masa para el carbón

Teniendo en cuenta el análisis de la variación de sólido por la reacción química y la variación de la humedad se obtiene la ecuación 2.11 que determina la variación del flujo del carbón a lo largo del reactor, considerando que los movimientos del carbón dentro del cilindro son en dirección positiva de la coordenada de z.

$$\frac{\partial \dot{m}_c}{\partial z} = -K_e \cdot e^{-\left(\frac{8033}{T_s}\right)} \cdot \dot{m}_v \frac{\dot{m}_c}{V_c} - \frac{h_i \cdot A \cdot (T_g - T_c) \cdot \dot{m}_h}{H_v \cdot (0,1 \cdot \dot{m}_c)} \quad (2.11)$$

Donde

K_e : Constante cinética de la reacción; (s⁻¹)

2.2.9. Balance de masa para el gas

De la misma manera que se realizó para la variación del carbón se determina el incremento de flujo de gas en el interior del cilindro si se tiene en cuenta la humedad cedida por el carbón y la transformación en gas de una porción del carbón. La tasa de incremento de flujo de gas debido a la evaporación de la humedad del carbón y los gases producto de la reacción química se determinan por la ecuación 2.12.

$$\frac{\partial \dot{m}_g}{\partial z} = K_e \cdot e^{-\left(\frac{8033}{T_s}\right)} \cdot m_v \frac{\dot{m}_c}{V_c} \cdot \frac{30}{12} + \frac{h_i \cdot A \cdot (T_g - T_c) \cdot \dot{m}_h}{H_v \cdot (0,1 \cdot \dot{m}_c)} \quad (2.12)$$

2.2.10. Determinación de los coeficientes de transferencia de calor

Para resolver el modelo matemático que describe el proceso de activación del carbón a través de las ecuaciones diferenciales (2.2), (2.5), (2.10), (2.11) y (2.12) es necesario establecer las ecuaciones para determinar los coeficientes que caracterizan los procesos de transferencia de calor (K).

Teniendo en cuenta la descripción de los procesos de transferencia de calor dadas a conocer en el capítulo anterior, se definen los coeficientes de transferencia de calor por unidad de longitud (K_n) a partir de las siguientes expresiones matemáticas.

Capítulo 2

$$K_1 = h_{gs} \cdot L_{ss} \quad (2.13)$$

$$K_3 = h_{gw} \cdot L_{pnc} \quad (2.14)$$

$$K_2 = \frac{\sigma \cdot L_{ss} \cdot e_w}{[1 - (1 - e_s) \cdot (1 - A_v)]} \quad (2.15)$$

$$K_4 = \frac{\sigma \cdot L_{pnc} \cdot e_w}{[1 - (1 - e_w) \cdot (1 - A_v)]} \quad (2.16)$$

$$K_5 = h_{sw} \cdot L_{pcs} \quad (2.17)$$

$$K_6 = \sigma \cdot L_{ss} \cdot \phi_{sw} \cdot e_w \cdot e_s \quad (2.18)$$

Donde:

K_5 : Coeficiente variable por unidad de longitud para la convección sólido- pared W/(m·K)

K_6 : Coeficiente variable por unidad de longitud para la radiación del sólido-pared; W/(m·K⁴)

h_{gs} : Coeficiente de transferencia de calor por convección del gas - sólido; W/(m²·K)

h_{gw} : Coeficiente de transferencia de calor por convección del gas - pared; W/(m²·K)

h_{sw} : Coeficiente de transferencia de calor por convección del gas a la sólido- pared; W/(m²·K)

L_{ss} : Longitud del arco del cilindro que está en contacto con el gas; m

L_{pnc} : Longitud del arco de la pared del cilindro no cubierto por el sólido; m

L_{pcs} : Longitud del arco que forma la pared cubierta por el sólido; m

σ : Constante de Stefan-Boltzmann; W/(m²·K⁴)

ϕ_{sw} : Número de radiación; adimensional

ΔH : Calor par la reacción química entre la corriente gaseosa y el carbón; kJ/ (k·mol)

2.3. Descripción de la aplicación GUI para la modelación del proceso de activación de carbón

Con el propósito de solucionar el modelo de una manera más sencilla y con el objetivo de facilitar el análisis de los principales parámetros de operación del objeto de estudio se utilizó

Capítulo 2

la herramienta interactiva GUIDE (Graphical User Interface Development Environment) para diseñar la interface de usuario o como se le conoce por la comunidad científica: GUI (Graphical User Interface). Dicha aplicación fue programada, en su totalidad, en la plataforma MATLAB 5.0.197616 64-bit (R2015a) sobre el sistema operativo Windows- 7.

Para diseñar la ventana de operación de la aplicación se tuvo en cuenta los elementos siguientes:

- **Edit Text:** que permiten al usuario entrar los datos de las variables empleadas en proceso de activación.
- **Static text:** brindan al usuario información como nombre de las variables y unidades de medidas, las cuales tienen que estar expresadas para que los resultados sean correctos.
- **Panel:** se emplea para agrupar una serie de botones y datos que responden a una información específica.
- **Axes:** permite visualizar el comportamiento de las variables de mayor interés en el proceso.
- **Radio button:** se explota con el objetivo de mostrar diferentes actuaciones de las variables analizadas.
- **Push button:** se emplea para realizar las operaciones de cálculo, guardar y graficar .

En la figura 2.2 se representa la pantalla principal de la aplicación GUI, donde se realiza la modelación del proceso de activación de carbón partiendo de los parámetros iniciales de la instalación, dichos parámetros pueden ser variados (en las cajas de texto editable) para diferentes condiciones de operación.

Capítulo 2

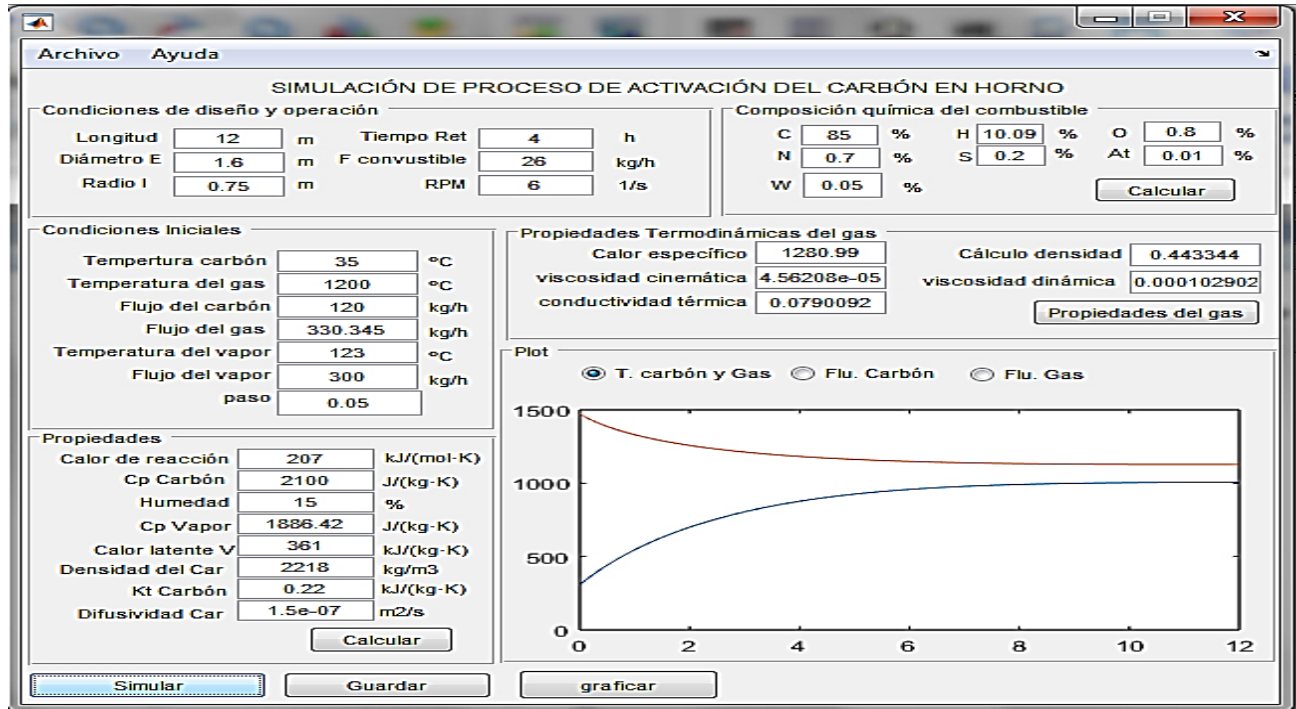


Figura 2.2. Ventana de operación de la aplicación.

Por otra parte, la aplicación grafica los comportamientos de las principales variables del proceso como (temperatura del carbón, temperatura del gas, flujo del gas, flujo del carbón) y crea una base de datos en un archivo xlsx con los resultados obtenidos en la modelación que permite hacer comparaciones de estos con otras simulaciones, llegando a conclusiones que favorezcan la eficiencia del proceso, en la tabla 2.1 se muestra la estructura de esta base de datos.

Tabla 2.1. Estructura de la base de datos que crea la aplicación de la modelación matemática.

L	Tc	Tg	Fg	Fc	Fh
(z=0)	Tc (z=0)	Tg (z=0)	Fg (z=0)	Fc (z=0)	Fh (z=0)
0+dz	Tc (0+dz)	Tg (0+dz)	Fg (0+dz)	Fc (0+dz)	Fh (0+dz)
-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-
(n+dz)	Tc (n+dz)	Tg (n+dz)	Fg (n+dz)	Fc (n+dz)	Fh (n+dz)

2.4. Método de solución

En la solución del modelo se utilizó el método numérico Runge Kutta cuarto orden. Este método matemático fue inicialmente desarrollado alrededor del año 1900 por los matemáticos Carle David Tolmé Runge y Martin Wilhelm Kutta, el cual permite resolver ecuaciones diferenciales no lineales y se puede obtener el valor aproximado de una variable Z_{n+1} de la solución de un problema de valor inicial en el punto X_{n+1} a partir de otro valor aproximado de Z_n de la solución en el punto X_n .

En análisis numérico, los métodos de Runge-Kutta (RK) son un conjunto de métodos iterativos (implícitos y explícitos) para la aproximación de soluciones de ecuaciones diferenciales ordinarias, concretamente, del problema de valor inicial (Burden, 2001; Uri M, 1998).

$$y'(t) = f(t, y(t)) \quad (2.19)$$

Una ecuación diferencial ordinaria, con $f: \Omega \subset \mathbb{R} \times \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$ donde Ω es un conjunto abierto, junto con la condición de que el valor inicial de f sea $(t_0, y_0) \in \Omega$. Entonces el método RK (de orden s) se define, en su forma más general, en la ecuación (2.20):

$$y_{n+1} = y_n + h \sum_{i=1}^s b_i k_i \quad (2.20)$$

Donde h es el paso por iteración, o lo que es lo mismo, el incremento Δt entre los sucesivos puntos t_n y t_{n+1} . Los coeficientes k_i son términos de aproximación intermedios, evaluados en f de manera local, ver ecuación (2.21).

$$k_i = f\left(t_n + hc_i, y_n + h \sum_{j=1}^s a_{ij} k_j\right) \quad i = 1, \dots, s. \quad (2.21)$$

Con a_{ij}, b_i, c_i coeficientes propios del esquema numérico elegido, dependiente de la regla de cuadratura utilizada. Los esquemas Runge-Kutta pueden ser explícitos o implícitos dependiendo de las constantes a_{ij} del esquema. Si esta matriz es triangular inferior con todos los elementos de la diagonal principal iguales a cero; es decir, $a_{ij} = 0$ para $j < i, \dots, s$, los esquemas son explícitos (Burden 2001; Uri M, 1998).

2.4.1. Método de Runge-Kutta 4to orden

Un miembro de la familia de los métodos Runge-Kutta es usado tan comúnmente que a menudo es referenciado como «RK4» o como «el método Runge-Kutta» (Burden, 2001; Uri M, 1998).

Definiendo un problema de valor inicial en la ecuación (2.22):

$$y' = f(x, y), \quad y(x_0) = y_0 \quad (2.22)$$

Entonces el método RK4 para este problema está dado por la ecuación (2.23):

$$y_{i+1} = y_i + \frac{1}{6}h(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) \quad (2.23)$$

Donde:

$$k_1 = f(x_i, y_i) \quad (2.24)$$

$$k_2 = f(x_i + \frac{1}{2}h, y_i + \frac{1}{2}k_1h) \quad (2.25)$$

$$k_3 = f(x_i + \frac{1}{2}h, y_i + \frac{1}{2}k_2h) \quad (2.26)$$

$$k_4 = f(x_i + h, y_i + k_3h) \quad (2.27)$$

Así, el siguiente valor (y_{n+1}) es determinado por el presente valor (y_n) más el producto del tamaño del intervalo (h) por una pendiente estimada. La pendiente es un promedio ponderado de pendientes, ecuación (2.28), donde k_1 es la pendiente al principio del intervalo, k_2 es la pendiente en el punto medio del intervalo, usando k_1 para determinar el valor de y en el punto $x_n + \frac{h}{2}$ usando el método de Euler, k_3 es otra vez la pendiente del punto medio, pero ahora usando k_2 para determinar el valor de y , k_4 es la pendiente al final del intervalo, con el valor de y determinado por k_3 . Promediando las cuatro pendientes, se les asigna mayor peso a las pendientes en el punto medio (Burden, 2001; Uri M, 1998).

$$pendiente = \frac{k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4}{6} \quad (2.28)$$

Esta forma del método de Runge-Kutta, es un método de cuarto orden lo cual significa que el error por paso o local es del orden de $0(h^5)$, mientras que el error total acumulado tiene el orden $0(h^4)$. Por tanto, la convergencia del método es del orden de $0(h^4)$, razón por la cual es usado en los métodos computacionales (Burden, 2001; Uri M, 1998).

Respecto a lo dicho anteriormente, el error total se puede estimar mediante la ecuación (2.29):

$$e_h = \frac{y_h - y_{2h}}{2^p - 1}$$

Con $p = 4$, es decir:
$$e_h = \frac{y_h - y_{2h}}{15} \quad (2.29)$$

De forma similar a la utilizada para RK2, se demuestra que el método es estable para la ecuación modelo (2.30):

$$\frac{dy}{dx} = -Ay \quad A > 0 \quad (2.30)$$

Si se toma $hA < 2,785$, lo cual se satisface para los valores de h utilizados normalmente.

2.4.2. Algoritmo en pseudo código para RK4

El algoritmo que sigue obtiene la solución aproximada del problema de Cauchy.

$$\frac{dy}{dx} = f(x, y) ; y(x_0) = y_0 \quad (2.31)$$

En un intervalo $x_0 \leq x \leq x_f$ con paso $h > 0$. Se suponen conocidos: la función $f(x, y)$, las condiciones iniciales (x_0, y_0) el valor final x_f y el paso h ; $n := 0$

Mientras que $x_n < x_f$; (x_n, y_n) es un punto de la solución aproximada.

$$x_{n+1} := x_n + h \quad (2.32)$$

$$n := n + 1 \quad (2.33)$$

Los métodos de Runge-Kutta tienen la ventaja de ser autoiniciadores, estables, dar una buena precisión y ser fáciles de computar. Tienen el inconveniente de no proporcionar una estimación de la precisión para saber si el tamaño de paso es el adecuado (Fehlberg, 1998).

2.4.3. Algoritmo de solución en MatLab para

Lo primero que se hace definir el número de paso o el intervalo en el cual se van hacer los cálculos, este se divide entre los intervalos analizados y se obtiene el número de soluciones, entre menor sea el valor de este, el error entre el valor obtenido del real es menor.

```
h= 0.2; % definición del Paso
a = 1; % definición de valor en cero de la variable independiente
x = 0:h:n; % Se define los intervalos
```

Capítulo 2

```
y = zeros(0,length(x)); % arreglo para la variable dependiente
y(1) = 3; % definición de valor en cero de la variable dependiente
F_xy = @(t,y)a-y; % define la función
for i=1:(length(x)-1) % algoritmo para el método de Runge Kutta
    A_1 = F_xy(x(i),y(i));
    A_2 = F_xy(x(i)+0.5*h,y(i)+0.5*h*A_1);
    A_3 = F_xy((x(i)+0.5*h),(y(i)+0.5*h*A_2));
    A_4 = F_xy((x(i)+h),(y(i)+A_3*h));
    y(i+1) = y(i) + (1/6)*(A_1+2*A_2+2*A_3+A_4)*h; %
end
```

2.5. Descripción del diseño de experimento para la simulación

Desde el punto de vista científico un experimento es un estudio de investigación en el que se manipulan deliberadamente una o más variables independientes (supuestas causas) para analizar las consecuencias que la manipulación tiene sobre una o más variables dependientes (supuestos efectos), dentro de una situación controlada (Guzmán, 1986).

El diseño de experimento tiene como uno de sus objetivos fundamentales, minimizar los errores experimentales en la investigación (Guzmán, 1986). Para esto es necesario conocer las principales variables que intervienen en el proceso de activación de carbón a la entrada y a la salida del horno.

Las variables utilizadas en nuestro diseño de experimento son:

- A la entrada: flujo del carbón (m_{ce}), flujo de vapor de agua (m_{ve}), flujo del gas (m_{ge}) que depende del consumo de combustible (B) y temperatura del gas (T_{ge}).
- A la salida: flujo del gas (m_{gs}), flujo del carbón (m_{cs}) y la temperatura del gas para diferentes puntos del cilindro (T_n)

Para el primer diseño experimento (tabla 2.2), se mantiene como constante el flujo del carbón (m_{ce}), el flujo de vapor de agua (m_{ve}) y el flujo del gas (m_{ge}) y se varía la temperatura del gas (T_{ge}).

Capítulo 2

Tabla 2.2- Primer diseño experimento.

Principales parámetros a la entrada (e)				Principales parámetros a la salida (s)					
m_{ce}	m_{ve}	m_{ge}	T_{ge}	m_{gs}	m_{cs}	T1	T2	T3	T4
m_{ce-1}	m_{ve-1}	m_{ge-1}	T_{ge-1}	-	-	-	-	-	-
m_{ce-1}	m_{ve-1}	m_{ge-1}	T_{ge-2}	-	-	-	-	-	-
m_{ce-1}	m_{ve-1}	m_{ge-1}	T_{ge-3}	-	-	-	-	-	-

En el segundo diseño de experimento se modificó el flujo del gas (m_{ge}) y se mantuvo constante el flujo del carbón (m_{ce}), la temperatura del gas (T_{ge}) y el flujo de vapor de agua (m_{ve}), dicho experimento se muestra en la tabla 2.3.

Tabla 2.3- Segundo diseño de experimento.

Principales parámetros a la entrada (e)				Principales parámetros a la salida (s)					
m_{ce}	m_{ve}	T_{ge}	m_{ge}	m_{gs}	m_{cs}	T1	T2	T3	T4
m_{ce-1}	m_{ve-1}	T_{ge-1}	m_{ge-1}	-	-	-	-	-	-
m_{ce-1}	m_{ve-1}	T_{ge-1}	m_{ge-2}	-	-	-	-	-	-
m_{ce-1}	m_{ve-1}	T_{ge-1}	m_{ge-2}	-	-	-	-	-	-

Como consiguiente, en la tabla 2.4 se representa el tercer diseño experimento, en este la variable a transformar es el flujo del carbón (m_{ce}) y deja como constantes la temperatura del gas (T_{ge}), el flujo del gas (m_{ge}) y el flujo de vapor de agua (m_{ve}).

Tabla 2.4- Tercer diseño de experimento.

Principales parámetros a la entrada (e)				Principales parámetros a la salida (s)					
m_{ge}	m_{ve}	T_{ge}	m_{ce}	m_{gs}	m_{cs}	T1	T2	T3	T4
m_{ge-1}	m_{ve-1}	T_{ge-1}	m_{ce-1}	-	-	-	-	-	-
m_{ge-1}	m_{ve-1}	T_{ge-1}	m_{ce-2}	-	-	-	-	-	-
m_{ge-1}	m_{ve-1}	T_{ge-1}	m_{ce-3}	-	-	-	-	-	-

Capítulo 2

Por último, se procede a realizar el cuarto diseño de experimento, mostrado en la tabla 2.5, en el cual las variables que van a tener un valor constante son el flujo del gas (m_{ge}), el flujo del carbón (m_{ce}) y la temperatura del gas (T_{ge}) y la incógnita a variar sería el flujo de vapor de agua (m_{ve}).

Tabla 2.5- Cuarto diseño de experimento.

Principales parámetros a la entrada (e)				Principales parámetros a la salida (s)					
m_{ge}	m_{ce}	T_{ge}	m_{ve}	m_{gs}	m_{cs}	T1	T2	T3	T4
m_{ge-1}	m_{ce-1}	T_{ge-1}	m_{ve-1}	-	-	-	-	-	-
m_{ge-1}	m_{ce-1}	T_{ge-1}	m_{ve-2}	-	-	-	-	-	-
m_{ge-1}	m_{ce-1}	T_{ge-1}	m_{ve-3}	-	-	-	-	-	-

2.6. Conclusiones del capítulo

1. Se describió el modelo matemático que caracteriza el proceso de activación de carbón en el objeto de estudio, el cual está compuesto por un sistema de ecuaciones diferenciales.
2. Se evidenció las principales características de la aplicación informática y el método utilizado para dar solución al modelo.
3. Se propuso un diseño de experimento y se establecieron los procedimientos para la simulación del proceso de activación de carbón en función de las principales variables que intervienen en el mismo.

CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN LA SIMULACIÓN DEL PROCESO DE ACTIVACIÓN DE CARBÓN

3.1. Introducción

De acuerdo a los conocimientos teóricos, procedimientos y el diseño de experimento propuesto en el capítulo 2 para la simulación del proceso de activación de carbón en el horno cilíndrico rotatorio, el presente capítulo tiene como principal objetivo realizar las simulaciones y analizar el comportamiento de las principales variables que intervienen en el proceso de activación de carbón.

3.2. Principales resultados

Teniendo en cuenta el diseño de experimento planteado en el capítulo anterior se realizaron las simulaciones del proceso de activación del carbón en la aplicación informática, donde se obtuvieron los principales resultados (ver tabla 3.1, 3.2, 3.3, 3.4).

La tabla 3.1 muestra los resultados de la simulación realizada manteniendo como constante los parámetros de entrada de (flujo del carbón, flujo del gas, flujo del vapor) y variando la temperatura del gas a la entrada del cilindro.

Tabla 3.1. Resultados de la simulación variando la temperatura del gas.

Principales parámetros a la entrada (e)				Principales parámetros a la salida (s)						Rendimiento (%)
mce (kg/h)	mve (kg/h)	mge (kg/h)	Tg (K)	mgs (kg/h)	mcs (kg/h)	T1 (K)	T2 (K)	T3 (K)	T4 (K)	
120,00	300,00	330,3	1373	436,7	65,84	1178,7	1171,6	1166,0	1163,2	54,87
			1470	480,62	48,55	1202,4	1183,1	1175,9	1172,6	40,46
			1570	526,16	30,87	1229,8	1197,3	1189,7	1186,3	25,73

De manera similar se realizó para los restantes parámetros de entrada, en los cuales se modificaron los flujos del carbón, del gas y del vapor obteniéndose como resultado las siguientes tablas (3.2, 3.3, 3.4):

Capítulo 3

Tabla 3.2. Resultados de la simulación variando el flujo del carbón.

Principales parámetros a la entrada (e)				Principales parámetros a la salida (s)						Rendimiento (%)
Tg (K)	mve (kg/h)	mge (kg/h)	mce (kg/h)	mgs (kg/h)	mcs (kg/h)	T1 (K)	T2 (K)	T3 (K)	T4 (K)	
1473	250	304	130	467,71	52,46	1191,4	1177,5	1169,3	1165,4	40,35
			150	492,75	60,44	1196,9	1186,4	1177,1	1172,7	40,29
			200	555,40	80,32	1219,5	1206,8	1195,2	1189,9	40,16

Tabla 3.3. Resultados de la simulación variando la temperatura del gas.

Principales parámetros a la entrada (e)				Principales parámetros a la salida (s)						Rendimiento (%)
Tg (K)	mve (kg/h)	mce (kg/h)	mge (kg/h)	mgs (kg/h)	mcs (kg/h)	T1 (K)	T2 (K)	T3 (K)	T4 (K)	
1423	320	135	254	467,5	94,9	1188,8	1176,5	1164,3	1157,9	70,3
			381	593,8	95,58	1235,8	1225,4	1216,5	1212,7	70,8
			508	657,3	95,8	1257,9	1248,3	1240,5	1237,3	70,9

Tabla 3.4. Resultados de la simulación modificando el flujo del vapor.

Principales parámetros a la entrada (e)				Principales parámetros a la salida (s)						Rendimiento (%)
Tg (K)	mge (kg/h)	mce (kg/h)	mve (kg/h)	mgs (kg/h)	mcs (kg/h)	T1 (K)	T2 (K)	T3 (K)	T4 (K)	
1373	330	150	150	443,13	135,3	760,4	917,9	917,9	982,3	90,2
			200	466,22	126	1194,3	1187,0	1180,4	1177,3	84,0
			250	487,75	117,4	1201,0	1192,4	1184,6	1180,9	78,3

3.3. Análisis de los resultados

A continuación se realizará el análisis correspondiente de los resultados planteados anteriormente, donde se tendrá en cuenta las relaciones existentes entre las variables analizadas (temperatura de los gases, flujo de carbón, flujo del gas y flujo de vapor).

3.3.1. Influencia de la temperatura en el proceso de activación de carbón

Según Chávez *et al*, (2012) la temperatura es un factor importante en el proceso de activación de carbón, es por ello que se hace el análisis de la influencia de esta variable en el proceso estudiado. A partir de las simulaciones realizadas se obtuvo el siguiente gráfico (figura 3.1) en la cual se representa cómo se comporta la variación de la temperatura de los gases y el carbón dentro del horno.

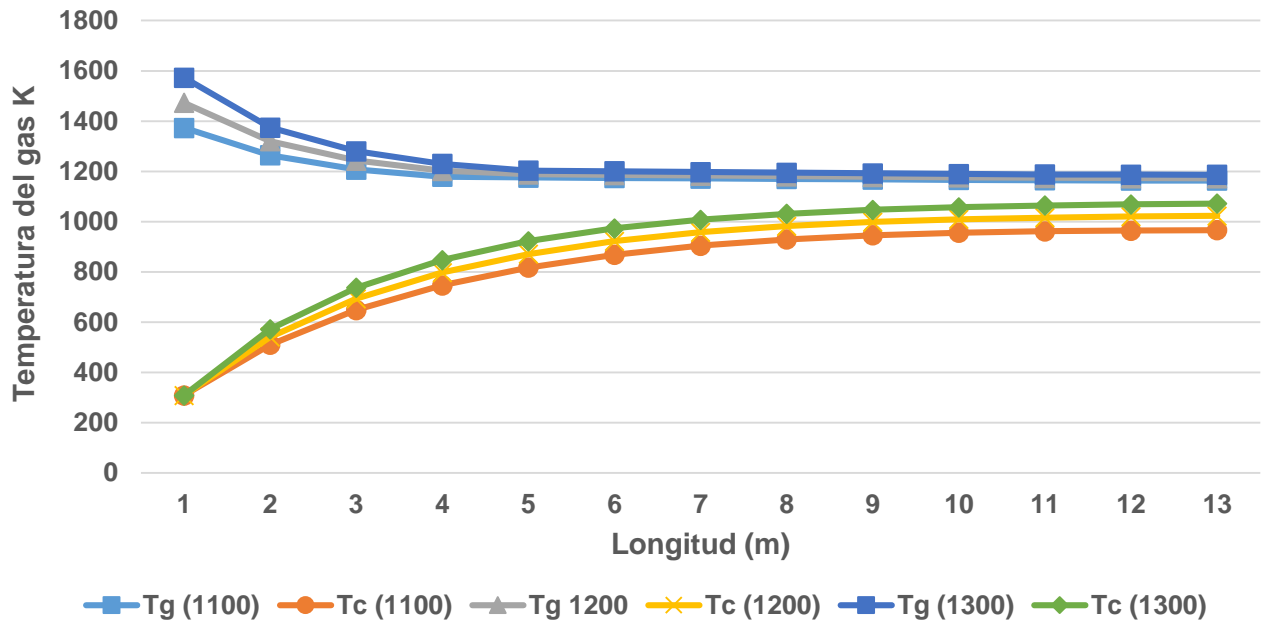


Figura 3.1. Distribución de la temperatura de los gases y del carbón.

Como se puede apreciar en la figura (3.1) la temperatura de los gases desciende rápidamente en los primeros cinco metros ya que esta sede calor al carbón suministrado al horno que entra a temperatura ambiente, después de estos cinco metros se alcanza casi un estado de equilibrio donde se mantienen casi constantes las temperaturas del gas y el carbón va incrementando su temperatura, pero con poca variación. También se puede apreciar, como es lógico, que a medida que se incrementan la temperatura del gas a la entrada aumenta la temperatura del carbón en el proceso de activación.

Es evidente que el aumento de la temperatura de los gases a la entrada influye directamente en la variación de la temperatura del carbón y como consecuencia en la velocidad de reacción del carbón con el vapor de agua (ver figura 3.2.)

Capítulo 3

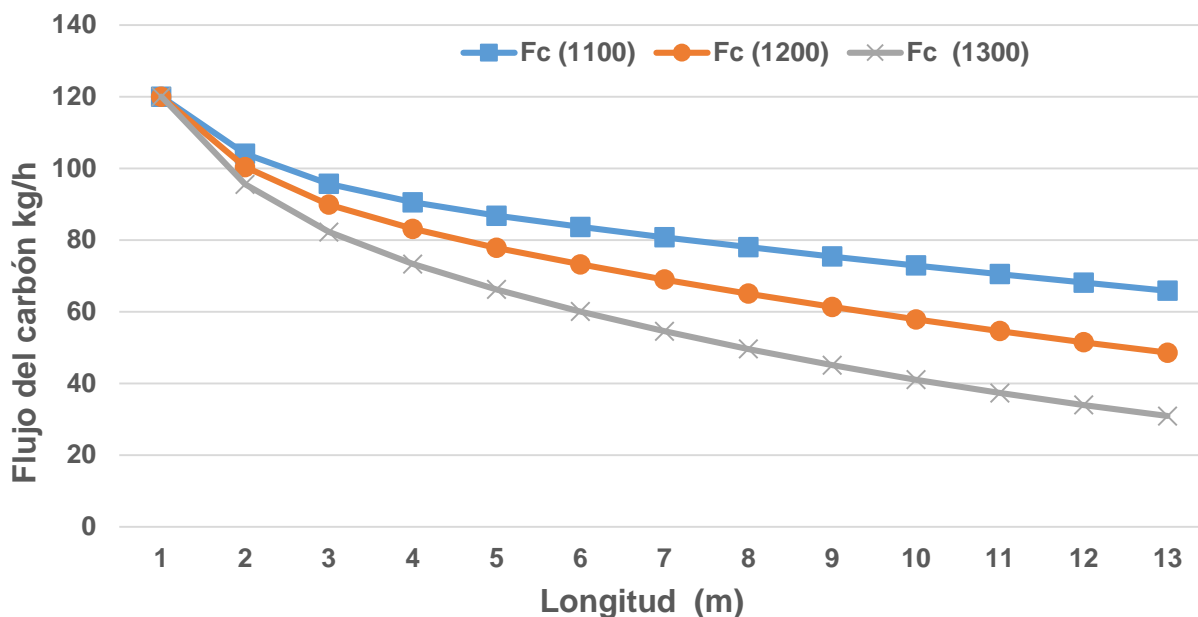


Figura 3.2. Variación del flujo de carbón en el proceso de activación en función de la temperatura del gas.

Según el comportamiento mostrado en la figura (3.2), que relaciona la variación del flujo de carbón en el interior del cilindro en dependencia de la temperatura de entrada, se puede afirmar que a medida que se aumenta la temperatura se incrementa la pérdida del sólido en el proceso de activación del carbón, corroborando lo planteado por Zalazar (2015), el cual afirma que la temperatura tiene un papel importante en las reacciones químicas. A medida que se incrementa la temperatura se intensifican las reacciones en el proceso de activación y por tanto disminuye el rendimiento productivo de este.

Lo anteriormente planteado se puede validar en los resultados mostrados en la figura 3.3 en la cual se muestra el comportamiento del rendimiento del proceso en función de la temperatura de entrada del gas, como se puede apreciar, a medida que se aumentó la temperatura del gas a la entrada (en 1100, 1200 y 1300°C) el rendimiento productivo del proceso disminuyó (en 55, 41 y 37 % respectivamente).

Capítulo 3

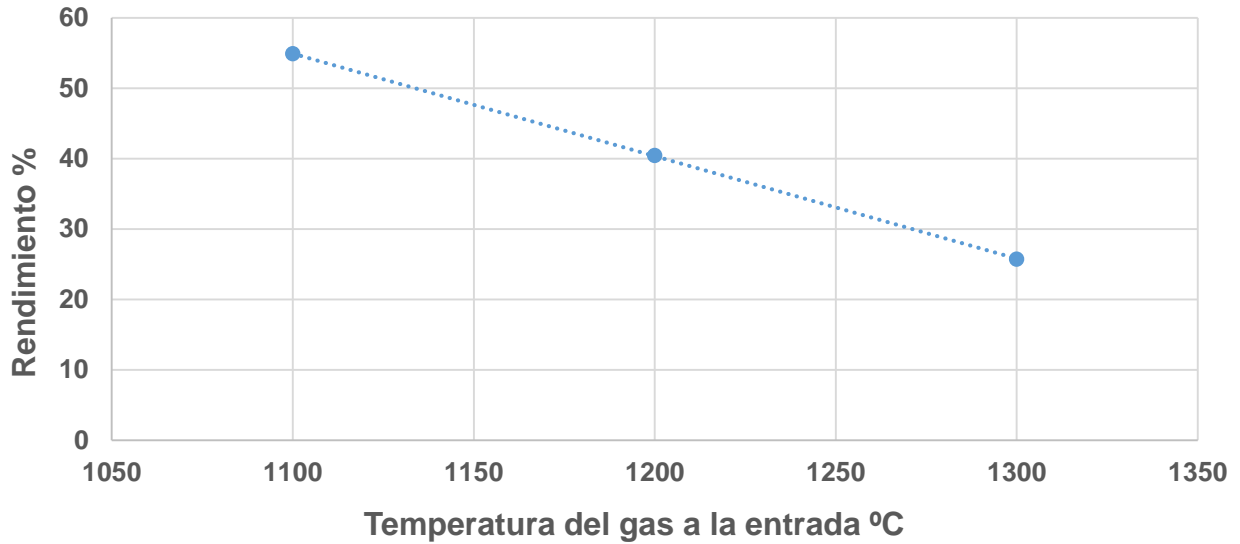


Figura 3.3. Rendimiento del proceso de activación del carbón.

3.3.2. Influencia de la variación del flujo de carbón

El segundo parámetro que se tuvo en cuenta para evaluar el proceso fue la influencia de las variaciones del flujo de carbón a la entrada del proceso. En la figura 3.4 se muestra el comportamiento entre la temperatura del gas y la variación del flujo del carbón a la entrada del horno. Se puede apreciar en la gráfica que un aumento de dicho flujo del carbón no es un factor que influya directamente en la distribución de la temperatura durante el proceso de activación del carbón, a pesar de que existe una variación en la temperatura para las tres variantes analizadas, las diferencias no son significativas y las variaciones son mínimas por

Capítulo 3

tal motivo el comportamiento que se muestra es prácticamente igual en las tres series.

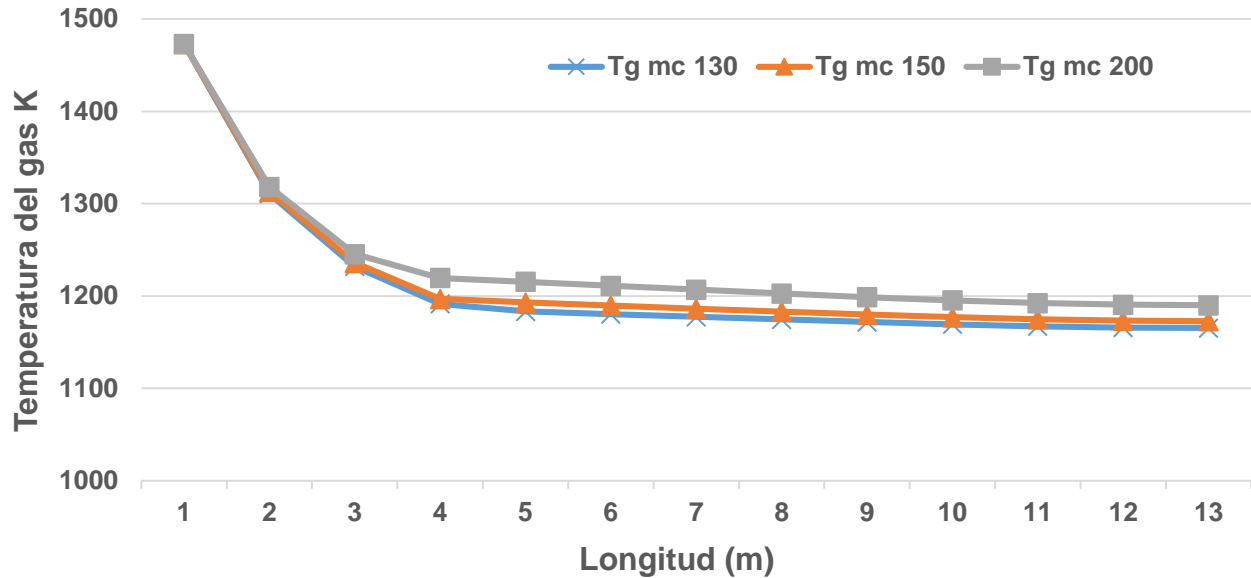


Figura 3.4. Distribución de la temperatura del gas aumentando el flujo del carbón.

A diferencia de la temperatura del gas, el flujo de los gases muestra un notable incremento respecto al aumento del flujo del carbón a la entrada del horno, esto se debe a que al proporcionarle en el interior del cilindro una mayor cantidad de carbón ocurre un aumento en las reacciones químicas generadas durante la activación del carbón y por tanto el flujo de los gases aumenta producto a estas reacciones, (ver figura 3.5).

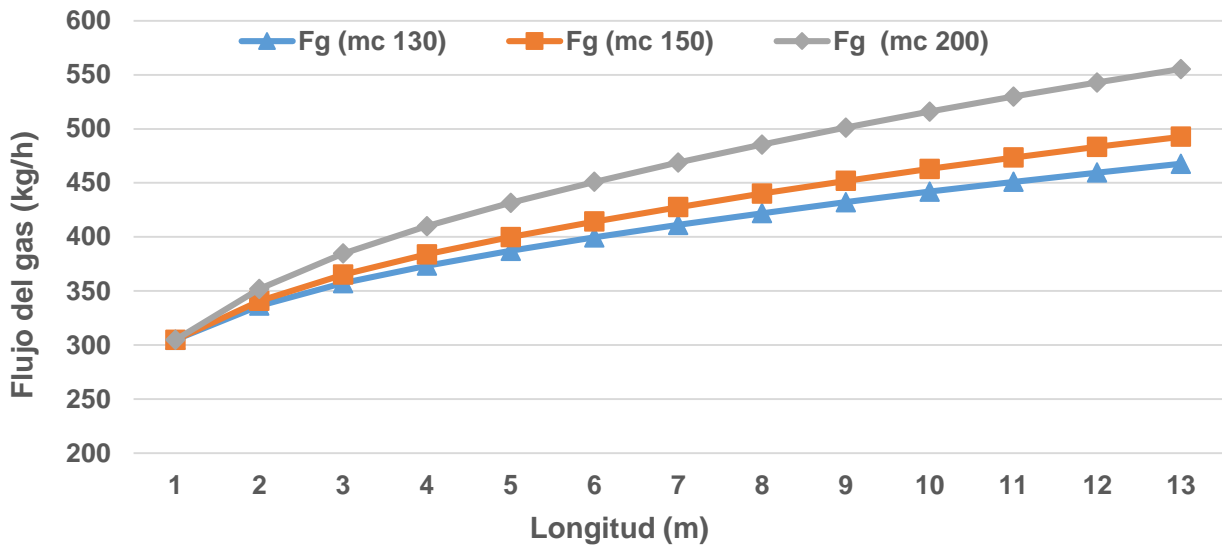


Figura 3.5. Flujo de los gases en el interior del horno.

Capítulo 3

La figura 3.6 representa el rendimiento del proceso de activación de carbón según las condiciones de trabajo analizadas anteriormente, en este caso se elevó el flujo del carbón trayendo consigo que se incrementara el flujo de los gases y que la temperatura se mantuviera estable y prácticamente igual en las tres series. Estas condiciones proporcionaron y dieron lugar a que el rendimiento de dicho proceso no sufriera grandes variaciones y que la diferencia entre ellos fuera mínima, aunque se puede decir que presenta una tendencia a disminuir a medida que aumenta el flujo de carbón, pero no es muy significativa.

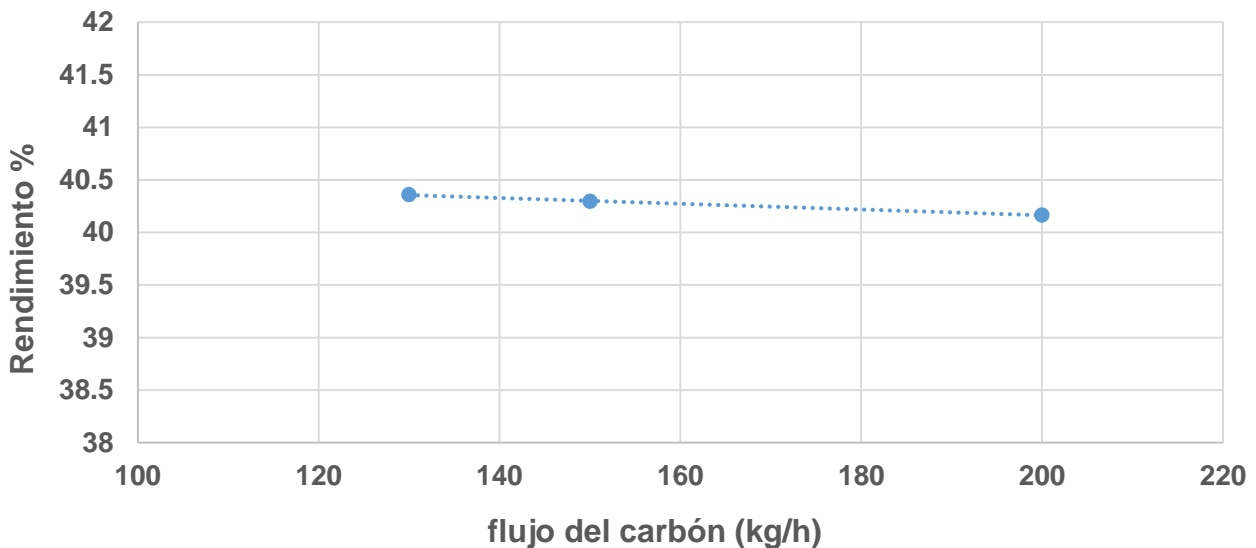


Figura 3.6. Rendimiento del proceso de activación del carbón.

3.3.3. Influencia del flujo de gases en el proceso

La gráfica de la figura 3.7 establece la relación que existe entre el flujo de los gases a la entrada y la distribución de la temperatura de estos y del carbón durante el transcurso del proceso de activación del carbón. En este caso ocurre de manera similar a la relación anteriormente explicada, un aumento del flujo de los gases hace pequeñas diferencias en las variaciones de la temperatura en el interior del cilindro, pero no lo suficiente para que provoque un cambio significativo en la temperatura de carbón.

Capítulo 3

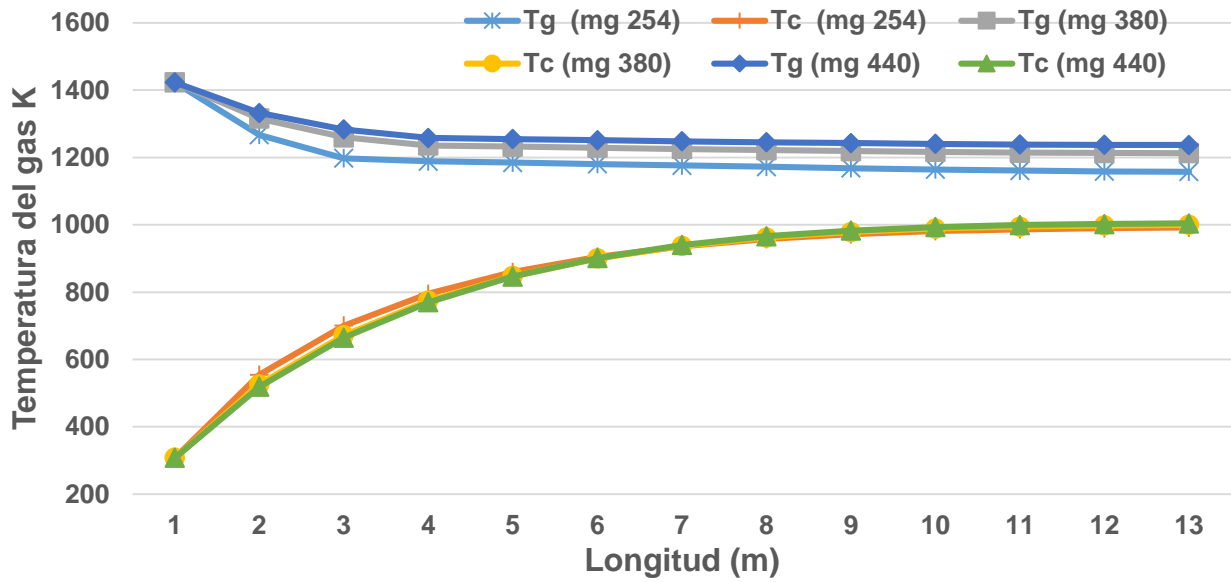


Figura 3.7. Relación entre la temperatura de los gases y el flujo de los mismos.

En la figura 3.8 se puede apreciar la relación que se establece entre la variación del flujo de los gases y el flujo del carbón a la salida. El aumento de flujo de los gases no influye directamente en el flujo del carbón que sale. Este comportamiento está dado por el comportamiento obtenido anteriormente (figura 3.7) en el cual se comprobó que el flujo del gas no hace cambios significativos en la temperatura del carbón por tanto las reacciones del carbón y el gas permanecen constantes.

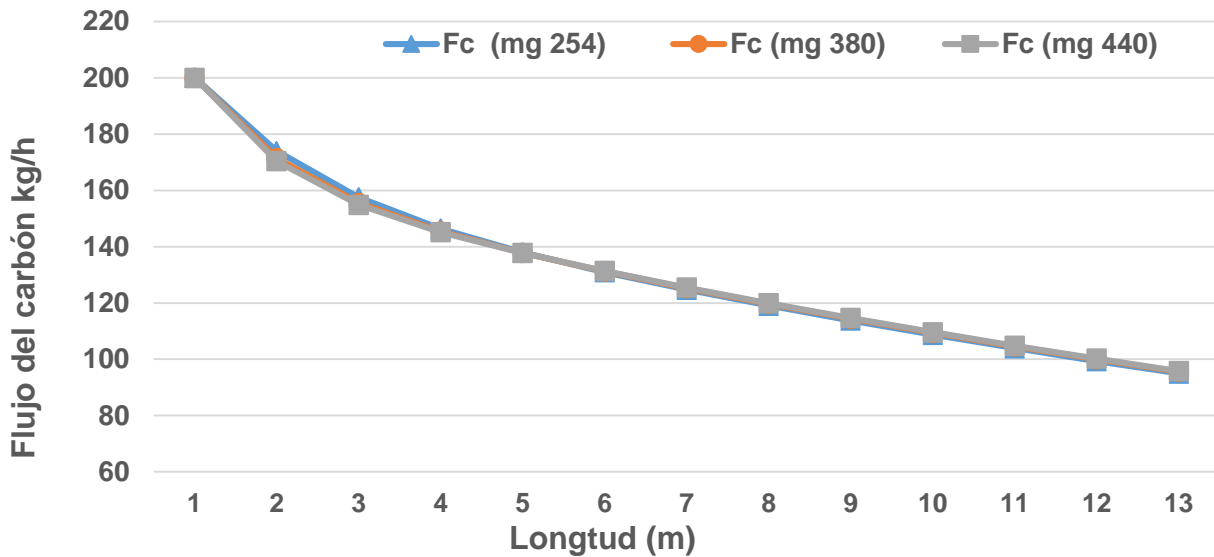


Figura 3.8. Relación del flujo de los gases a la entrada del horno y el flujo del carbón.

Capítulo 3

Como en la simulación anterior el comportamiento del rendimiento del proceso se mantuvo prácticamente igual para los flujos de gases analizados (ver en la figura 3.9) aunque se puede destacar que a diferencia de las demás simulaciones, en este caso, el rendimiento tiende a aumentar, aunque en una pequeña proporción porque la diferencia entre estos es insignificante, por lo que el autor considera que el incremento del flujo de los gases no incide ni afecta en el rendimiento del proceso de activación del carbón.

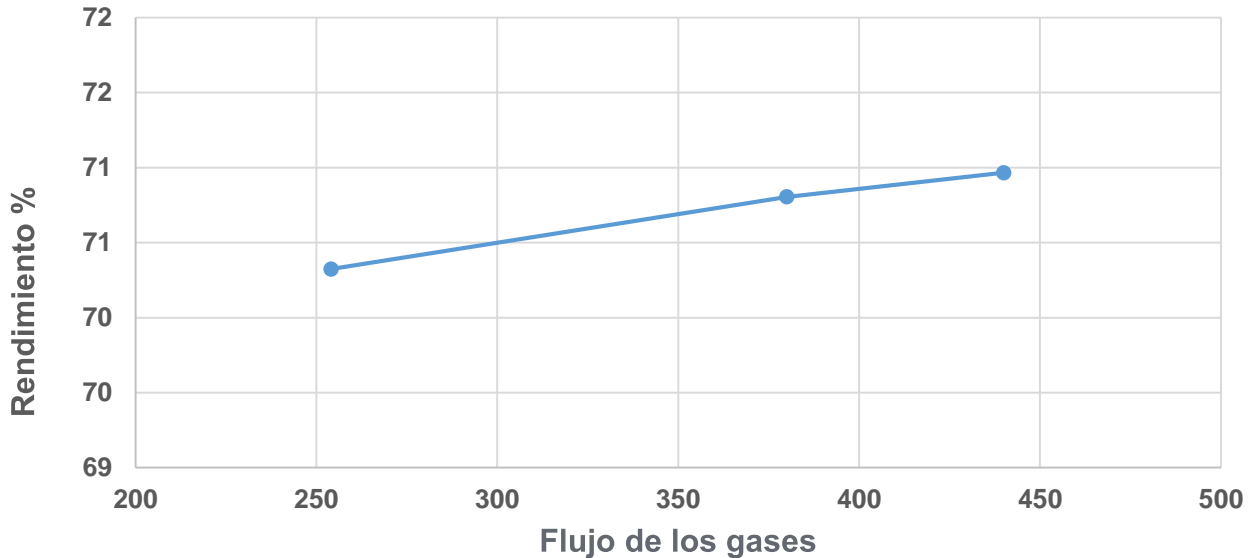


Figura 3.9. Rendimiento del proceso en función del flujo de los gases.

3.3.4. Influencia del flujo de vapor en el interior del horno

La figura 3.9 muestra el comportamiento de la temperatura de los gases y la temperatura del carbón con un aumento del flujo del vapor. Como se puede apreciar en la gráfica el flujo del vapor no influye en la distribución de estas temperaturas, por lo que la distribución de la temperatura del gas y del carbón para los distintos flujos de vapor se superpone una sobre la otra, por lo que no se puede casi apreciar las diferencias entre las variantes analizadas.

Capítulo 3

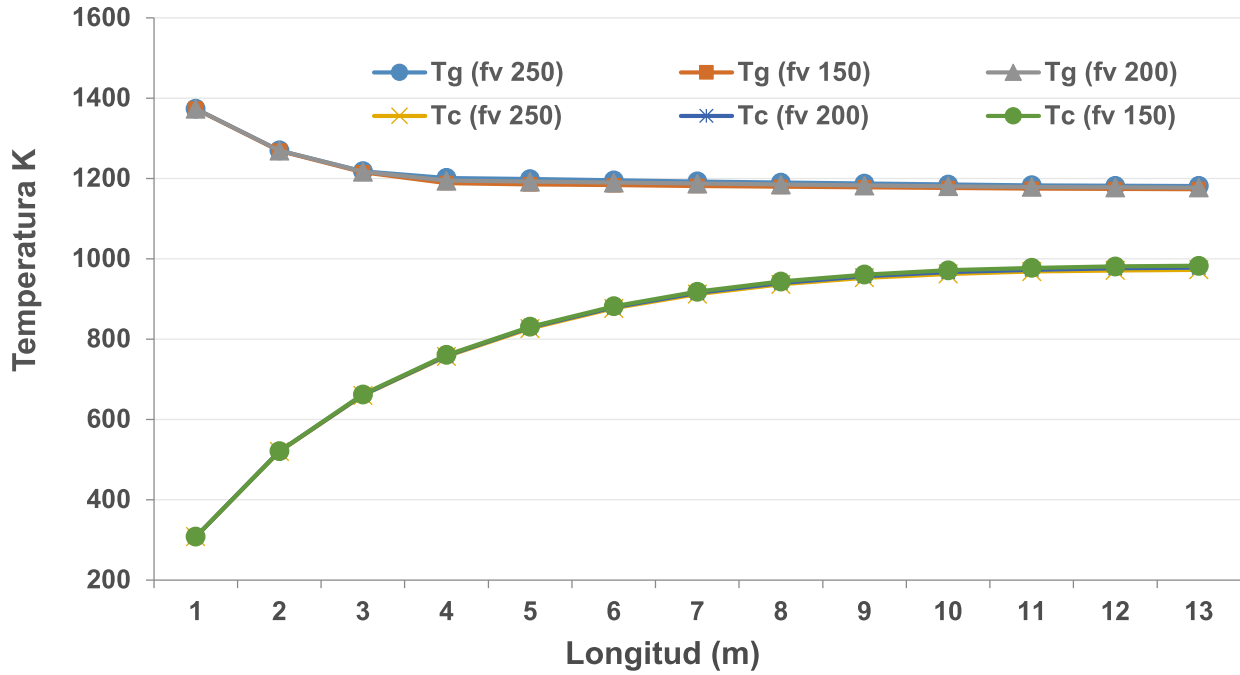


Figura 3.9. Relación entre la temperatura de los gases y el flujo del vapor.

A diferencia de la temperatura, el flujo de carbón sufre variaciones en función de la variación del flujo de vapor como se muestra en la figura 3.10.

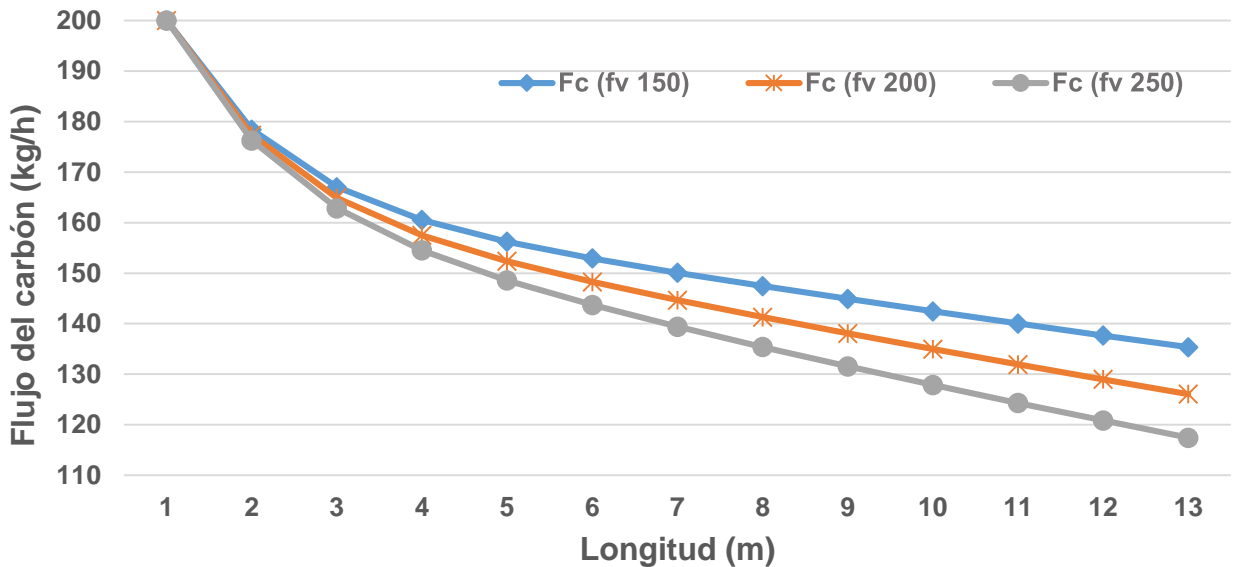


Figura 3.10. Relación del flujo del vapor a la entrada del horno y el flujo del carbón.

La figura 3.10 representa el descenso que sufre el flujo del carbón respecto al incremento del flujo del vapor, esto se debe a que al suministrar mayor cantidad de vapor al horno

propicia que se incrementen el número de reacciones del carbón con el agente activante (vapor de agua) obteniéndose un mayor grado de activación (capacidad de absorción) pero menor producción de carbón. Por tanto, este afecta considerablemente el rendimiento productivo del proceso como se muestra en la siguiente figura (3.11).

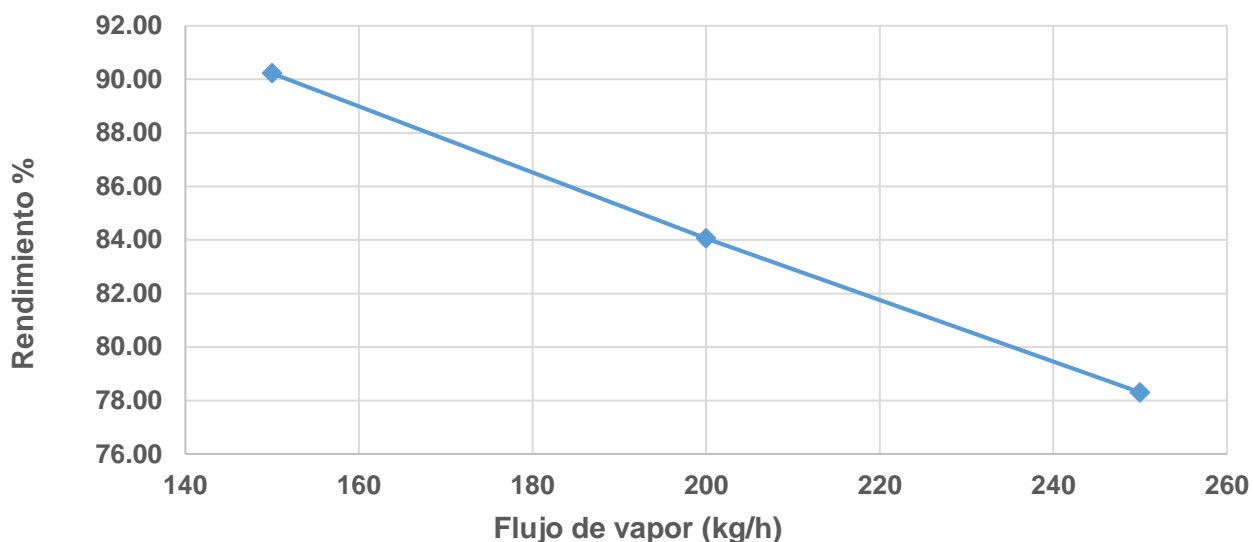


Figura 3.11. Rendimiento del proceso de activación del carbón.

3.4. Valoración económica

Es oportuno destacar que todas las inversiones e investigaciones que se realizan en Cuba deben cumplir tres requisitos inviolables: primero, deben ser compatibles con los principios de la defensa nacional, deben ser económicamente factibles y deben contribuir a la preservación y mejora del medio ambiente, en correspondencia con esto en el presente epígrafe se realiza la valoración económica del proceso de activación del carbón a partir del consumo de combustible que se emplea en la cámara de combustión.

Vinculando la presente investigación y los gastos económicos asociados a la producción de carbón se llegó al siguiente análisis. Se puede decir que cada diseño de experimento se efectúa en 12 h de una jornada de trabajo, para las tres series propuestas, 4 h para cada una de estas series ya que este es el tiempo requerido para la activación del carbón, por tanto, para que se ejecuten los cuatro diseños de experimentos es necesario utilizar 48 h de experimentación en la instalación. La cantidad promedio de combustible que se emplea para la producción de carbón activado es de 26 kg/h, por lo cual, si se multiplica la cantidad

Capítulo 3

de horas que se requieren para el desarrollo de los experimentos propuestos se tiene que el consumo de combustible requerido es de 1248 kg . Teniendo en cuenta que el precio del petróleo en el mercado internacional es de 44,7 CUC/barril (Precio del petróleo, 2017) entonces el gasto económico que se genera en la experimentación es de 3669,6 CUC .

El desarrollo de investigaciones de este tipo es de gran utilidad ya que estos gastos económicos no son necesarios debido a que no es preciso el uso de la instalación. Además se obtienen resultados invariables sin la necesidad de realizar interrupciones en el proceso productivo en la planta o la unidad en donde se encuentre el objeto de estudio.

3.5. Principales problemas ambientales detectados en la planta

Las principales afectaciones al medio ambiente provocadas por el proceso de activación de carbón están dadas por:

La emanación de los gases producto de la combustión como son el monóxido de carbono CO y monóxido de azufre SO, que a pesar de que los niveles de emanación de estos gases cumplen las normas requeridas se deben tener un control constante de estos gases mediante un monitoreo periódico.

La acción del CO sobre el organismo humano se manifiesta en las perturbaciones funcionales del sistema nervioso central, dolores de cabeza, enflaquecimiento, sensaciones dolorosas en el corazón, náuseas y vómitos; consecuencias de la sub alimentación de oxígeno.

Esto ocurre porque el CO altera la composición de la sangre, reduce la formación hemoglobina, entrando en reacción con esta, y perturba el proceso de oxigenación del organismo (la absorción de CO en la sangre es 240 veces más que la del oxígeno).

Con concentraciones de CO en el aire, superiores a 0,01 % y 0,02% (por volumen) se observan síntomas de intoxicación y cuando llega a ser entre 0,2 % y 0,25 %, viene el desmayo en unos 25 a 30 minutos. El límite máximo de concentración de CO en el aire es de 1 mg/m³ .

La zona de preparación de carbón (depósito de homogenización, transportadores de banda, hasta el horno de activación), constituyen áreas de contaminación por polvo.

Capítulo 3

Las principales afectaciones provocadas por el polvo al medioambiente están dadas por: Las partículas suspendidas en la atmósfera absorben la luz solar, reduciendo la energía que llega a la tierra y produciendo cambios que disminuyen notablemente la luminosidad y visibilidad; además de la luz solar las partículas en suspensión absorben la luz producida por medios artificiales.

Las partículas pequeñas pueden entrar al cuerpo humano a través del sistema respiratorio y el efecto que se produce depende de su tamaño, la composición química y mineralógica, densidad, superficie específica y otras.

Las partículas de tamaño superior a 5 μm de diámetro quedan retenidas en los vellos de la cavidad nasal y también pueden quedar atrapadas por la mucosa que tapiza la tráquea y la cavidad nasal. Los comprendidos entre 0,5 y 5 μm son capaces de penetrar hasta el sistema respiratorio inferior depositándose en los bronquios. De aquí a que en la mayoría de los casos sean eliminados al cabo de algunas horas por respiración. La situación más preocupante corresponde a las partículas menores de 0,5 μm , ya que se ha estimado que más del 50 % de las partículas de 0,01 a 0,1 μm que penetran en los alvéolos se depositan allí, donde es difícil eliminarlos por carecer de cilios y mucosas, pudiendo permanecer durante meses e incluso durante años degradando la salud del hombre.

3.6. Conclusiones del capítulo

Como conclusiones del capítulo se tienen las siguientes:

1. Se realizaron las simulaciones del proceso de activación del carbón para varias condiciones de operación y se plantearon los resultados en tablas.
2. Se analizaron los resultados de dichas simulaciones en gráficas, teniendo en cuenta la relación existente entre las principales variables que intervienen en el proceso (flujo de carbón, flujo del gas, temperatura del gas y el flujo de vapor) y las variaciones que sufrieron cada una de ellas.

Conclusiones

Conclusiones generales

1. A partir del análisis de las principales variables (flujo de carbón, gases de la combustión, vapor de agua, temperatura del gas) y los procesos que intervienen en el horno para la activación de carbón se realizó un diseño de experimento en los cuales se relacionan dichas variables.
2. Se realizaron cuatro simulaciones, en las cuales se tuvo en cuenta las principales variables de entrada que se analizaron en la presente investigación, manteniéndose constante tres parámetros y modificándose un cuarto, en tres niveles, obteniéndose la relación de estas sobre los parámetros de salida.
3. En el análisis de los principales resultados, se llegó a la conclusión que los valores óptimos para el proceso se obtienen para: temperatura de entrada del gas de 1100 a 1200°C, flujo de carbón de 120 a 130 kg/h y flujo de vapor de 300 a 320 kg/h , obteniéndose valores de rendimiento entre un 70 y 80 % .
4. El desarrollo de investigaciones de este tipo son de gran beneficio no solo académico sino también económico, ya que realizar experimentaciones como se propone en el epígrafe 2.5 genera un gasto económico de 3669,6 CUC .

Recomendaciones

Recomendaciones

1. Se recomienda a los directivos de la fábrica de carbón activado que opere la instalación en los rangos planteados en las conclusiones para que se obtenga los mejores valores del rendimiento.
2. Continuar el estudio del proceso y mejorar la aplicación informática con el fin de no solo analizar el proceso sino también para la supervisión y control automático del proceso.
3. La presente investigación se utilice como material de estudio en la carrera de ingeniería mecánica en los próximos cursos.

Bibliografía

- Ascher, Uri M.; Petzold, Linda Ruth (1998). Computer methods for ordinary differential equations and differential-algebraic equations (en inglés) (1ª edición). Philadelphia (USA): SIAM. ISBN 0898714125.
- Bah, A. I. (2012). Tesis Doctoral. Preparación y caracterización de carbón activado. UNIVERSIDAD DE EXTREMADURA.
- BAH, A. I. Preparación y caracterización de carbón activado a partir de residuos de biomasa y su utilización en tratamientos de descontaminación del agua. Doctoral UNIVERSIDAD DE EXTREMADURA, 2012.
- Builes, J. F., & Yepes, W. A. (2004). Selección de un método para producir carbón activado utilizando cuatro especies forestales. Facultad Nacional de Agronomía, Medellín.
- CANGIALOSI, F.; CANIO, F. D.; et al., "Experimental and theoretical investigation on unburned coal char burnout in a pilot-scale rotary kiln". Fuel, 2006, vol. 85, no. 16, p. 2294-2300.
- CASTAÑO, L. F. C., "Aportaciones al modelado y control de secaderos rotatorios". Tesis Doctoral. Universidad de Sevilla. 2003.
- CASTAÑO, L. F. C.; RUBIO, F. R.; ORTEGA, M. G., "Modelado de secaderos rotatorios en isocorriente.". Revista Iberoamericana de automática e informática industrial, 2009, vol. 6, no. 4, p. 32-43.
- Chalarca, L. T. (2013). Activación de carbones activados para aplicación en almacenamiento de gas natural vehicular (Metano). Medellín, Colombia, Universidad Nacional de Colombia Facultad de Minas, Escuela de Procesos y Energía.
- COULSON, J. A. J. R. 1981: Ingeniería Química: Operaciones Básicas. Editorial Reverté S. A.
- E.Fehlberg,"Classical 5th, 6th, 7th and 8th Orders Runge-Kutta Methods, NASA Technical Report N ° 287 (1968) and Computing J.Vol. 4 (1969)".
- espaciovarsavsky.com. (11 de 2011). Recuperado el 24 de 3 de 2017, de <http://www.oviedocorreo.es/personales/carbon/cactivo/impqcatex.htm>.
- Gómez, A. (2004). Proceso de producción de carbón activado. Kassel, Alemania., Instituto de Ingeniería Térmica, Universidad de Kassel.
- GÓMEZ, A., W. KLOSE, S. L. RINCÓN & W. WIEST. 2004: Proceso de producción de carbón activado a partir de cáscaras de palma de aceite en un horno rotatorio y su aplicación en la limpieza de NO. Palma. 25. Disponible en:<http://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/viewFile/1113/1113>.

Bibliografías

- GÓNGORA LEYVA , E., "MODELACIÓN DEL PROCESO DE ENFRIAMIENTO DEL MINERAL LATERÍTICO EN CILINDROS HORIZONTALES ROTATORIOS". Doctorado ISMM. Moa 2014.
- GÓNGORA-LEYVA, E., "Modelación físico-matemática del proceso de enfriamiento de mineral en cilindros rotatorios de la planta hornos de reducción de la empresa "Comandante Ernesto Che Guevara"". Tesis de Maestría. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa "Dr. Antonio Núñez Jiménez". Moa-Cuba, 2004.
- GÓNGORA-LEYVA, E., "Modelo Matemático del proceso de enfriamiento de mineral en cilindros horizontales rotatorios". In CENDA. Ciudad de La Habana. Cuba: 358-2006, 2006.
- GÓNGORA-LEYVA, E.; COLUMBIÉ, N. Á. O.; et al., "Modelo matemático multivariable para un proceso de enfriamiento industrial de sólidos en cilindros rotatorios horizontales". In Proceedings of the 5to Taller Internacional de Energía y Medio ambiente, Cienfuegos. 2008.
- GOROG, J. P., T. N. ADAMS & J. K. BRIMACOMBE. 1982: Regenerative Heat Transfer in Rotary Kilns. Metallurgical and Materials Transactions B. 13B, 153-163.
- GOROG, J. P.; ADAMS, T. N.; BRIMACOMBE, J. K., "Regenerative Heat Transfer in Rotary Kilns". Metallurgical and Materials Transactions B, 1982, vol. 13B, p. 153-163.
- GUZMÁN, D. R. D. Modelación, simulación y control del tanque de contacto y los enfriadores de licor en el proceso de lixiviación carbonato-amoniaco. Tesis Doctoral. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa "Dr. Antonio Núñez Jiménez", 2001.
- GUZMÁN, D. R. D. Modelación, simulación y control del tanque de contacto y los enfriadores de licor en el proceso de lixiviación carbonato-amoniaco. Tesis Doctoral. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa "Dr. Antonio Núñez Jiménez", 2001.
- Guzmán, J. Diseño de experimentos para Ingenieros Mecánicos. Santiago de Cuba: Ediciones ISJAM, 1986
- HAN, S. H. & D. CHANG. 2012: Optimum residence time analysis for a walking beam type reheating furnace. International Journal of Heat and Mass Transfer. 55(15–16), 4079-4087. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0017931012001986>.
- Harrington, H. J.; Tumay, K.: Simulation modeling models. McGraw Hill New York. 1999. USA.
- High Performance Systems: <http://www.hps-inc.com>
- Jhara Chávez, K. B. (2012). Influencia de la temperatura, tiempo de residencia y relación carbón activado/zumo de fruta en la absorbancia y retención de compuestos. Agroindustrial Science.

Bibliografías

- KIM, N. & R. SRIVASTAVA. 1990: Simulation and Control of an Industrial Calciner. *Ind. Eng. Chem.* 1. Res. 29, 71-78.
- KIM, Y. H., "Development of process model of a rotary kiln for volatile organic compound recovery from coconut shell". *Korean J. Chem. Eng.*, 2012, vol. 28, no. 7, p. 1025-1031.
- LEGRÁ, L. A. A. & O. SILVA. 2011. *La investigación científica: Conceptos y Reflexiones*. Félix Varela, La Habana: 445 p.
- MARTÍNEZ, N. 1998: Ecuación Cinética para la activación de Carbón de Eucalipto. Instituto de Ingeniería Química, Universidad Nacional de San Juan.
- Monografias.com. (s.f.). Recuperado el 21 de 09 de 2010, de <http://www.monografias.com/trabajos45/carbon-activado/carbon-activ>.
- ORTIZ, O. A., N. D. MARTINEZ, C. A. MENGUAL & S. E. NORIEGA. 2003: Steady state simulation of a rotary kiln for charcoal activation. *Latin American Applied Research*. 33, 51-57.
- ORTIZ, O. A.; MARTINEZ, N. D.; et al., "Steady state simulation of a rotary kiln for charcoal activation". *Latin American Applied Research*, 2003, vol. 33, p. 51-57.
- PUJOL-LEYVA, J. O., "Evaluación del proceso de transferencia de calor en el enfriamiento del mineral laterítico a escala piloto". Tesis de Ingeniería. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa "Dr. Antonio Núñez Jiménez". Moa-Cuba, 2007.
- Richard L. Burden, J. Douglas Faires (2001). 7, ed. *Análisis Numérico*. Cengage Learning Latin America. ISBN 9706861343.
- Shannon, Robert; Johannes, James D. (1976). «Systems simulation: the art and science». *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*. 6(10). pp. 723-724.
- Toledano, E. L. (21 de 09 de 2010). *Fábrica de carbón activado: Única, imprescindible y económica*. Venceremos.cu.
- YEHASKEL, A. 1978: *Activated Carbon: Manufacture and Regeneración*. Noyes Data Corporation.
- Zalazar-Oliva, C., Góngora-Leyva, E., Retirado-Mediaceja, Y., Falconí-Borja, M. A., & Mata-Jácome, L. F. (2016). Modelación matemática del proceso de activación de carbón vegetal en horno cilíndrico rotatorio. *Minería y Geología* 2016 32(2), 140-154.