



Universidad de San Carlos de Guatemala  
Facultad de ingeniería  
Escuela de Ingeniería Química

## **ANÁLISIS DE FACTIBILIDAD ECONÓMICA DE UN HORNO DE REGENERACIÓN DE CARBÓN ACTIVADO GRANULAR**

**Ricardo Ernesto Grijalva Menéndez**

Asesorado por: Inga. Miriam Judith Mencos Contreras

Guatemala, agosto de 2008

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ANÁLISIS DE FACTIBILIDAD ECONÓMICA DE UN HORNO DE REGENERACIÓN  
DE CARBÓN ACTIVADO GRANULAR**

PRESENTADO A JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR:

**RICARDO ERNESTO GRIJALVA MENÉNDEZ**

ASESORADO POR: ING. MIRIAM JUDITH MENCOS CONTRERAS

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE  
**INGENIERO QUÍMICO**

GUATEMALA, AGOSTO DE 2008

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO: Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos  
VOCAL I: Ing. Glenda Patricia García Soria  
VOCAL II: Inga. Alba Maritza Guerrero de López  
VOCAL III: Ing. Miguel Ángel Dávila Calderón  
VOCAL IV: Br. Kenneth Issur Estrada Ruiz  
VOCAL V:  
SECRETARIA: Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANO: Ing. Sydney Alexander Samuels Milson  
EXAMINADOR: Ing. Cesar Alfonso García Guerra  
EXAMINADOR: Ing. Adolfo Gramajo Antonio  
EXAMINADOR: Ing. Víctor Manuel Monzón Valdez  
SECRETARIO: ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco

**HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR**

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

ANÁLISIS DE FACTIBILIDAD ECONÓMICA DE UN HORNO DE REGENERACIÓN DE CARBÓN  
ACTIVADO GRANULAR,

tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química,  
con fecha abril de 2005.



Ricardo Ernesto Grijalva Menéndez

Km. 26.5 Carretera Sta. Elena Barillas  
Guatemala, Centro América  
Tel: (502) 6634-3737 Fax: (502) 6634-3738  
Cel.: (502) 5764-6487  
E-mail: mmencos@comerrsa.com

---

Guatemala, 17 de abril del 2008

Señores  
Escuela de Ingeniería Química  
Facultad de Ingeniería  
**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**  
Ciudad Universitaria, Zona 12.  
Presente.

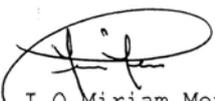
Estimados Señores:

Reciban un cordial saludo de mi parte. La presente tiene el motivo de certificar que, luego de haber sometido a revisión el trabajo de tesis, del alumno Ricardo Ernesto Grijalva Menéndez, No. Carné 2000-10519, con título del trabajo:

**Análisis de factibilidad económica de un horno de regeneración de carbón activado granular**

Considero que se encuentra listo para su presentación, por lo tanto doy por **APROBADO** dicho documento.

Nuevamente muchas gracias y para los fines que correspondan, atentamente,

  
I.O. Miriam Mencos  
Número de Colegiado 853

M.Sc. Q. Miriam Mencos  
Col. No. 852



**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA**

---

Guatemala, 22 de Julio de 2008  
Ref. EI.Q.189.2008

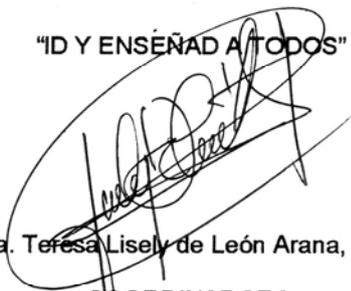
Ingeniero  
**Williams Guillermo Álvarez Mejía**  
DIRECTOR  
Escuela de Ingeniería Química  
Facultad de Ingeniería  
Presente.

Estimado Ingeniero Álvarez:

Como consta en el Acta TG-043-08-B-IF le informo que reunidos los Miembros del Tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del informe final del trabajo de graduación, para optar al título de INGENIERO QUÍMICO al estudiante universitario **RICARDO ERNESTO GRIJALVA MENÉNDEZ**, identificado con camé No. **2000-10519**, titulado: **ANÁLISIS DE FACTIBILIDAD ECONÓMICA DE UN HORNO DE REGENERACIÓN DE CARBÓN ACTIVADO GRANULAR**, el cual ha sido asesorado por la Ingeniera Química Miriam Mencos como consta en el Acta.

Habiendo encontrado el referido informe final **satisfactorio**, se procede a recomendarle autorice al estudiante **Grijalva Menéndez** proceder con los trámites requeridos de acuerdo a normas y procedimientos establecidos por la Facultad para su autorización e impresión.

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"

  
Inga. Teresa Lisely de León Arana, M.Sc.

**COORDINADORA**  
Tribunal que revisó el informe final  
Del trabajo de graduación



**ESCUELA DE**  
**INGENIERIA QUIMICA**

C.c.: archivo



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA.

---

El Director de la Escuela de Ingeniería Química Ing. Williams Guillermo Álvarez Mejía, M.Sc. Después de conocer el dictamen del Asesor y de los Miembros del Tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química para revisar el trabajo de graduación del estudiante **Ricardo Ernesto Grijalva Menéndez** titulado: "ANÁLISIS DE FACTIBILIDAD ECONÓMICA DE UN HORNO DE REGENERACIÓN DE CARBÓN ACTIVADO GRANULAR", procede a la autorización del mismo, ya que reúne rigor, coherencia y calidad requeridos.

Ing. Williams Guillermo Álvarez Mejía M.Sc.  
DIRECTOR ESCUELA INGENIERÍA QUÍMICA



Guatemala, agosto de 2,008

Universidad de San Carlos  
de Guatemala



Facultad de Ingeniería  
Decanato

Ref. DTG.279.08

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al trabajo de graduación titulado: **ANÁLISIS DE FACTIBILIDAD ECONÓMICA DE UN HORNO DE REGENERACIÓN DE CARBÓN ACTIVADO GRANAULAR**, presentado por el estudiante universitario **Ricardo Ernesto Grijalva Menéndez**, procede a la autorización para la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

Ing. Murphy Olimpo Paiz Recinos  
DECANO

A large, stylized handwritten signature in black ink, appearing to be 'Murphy Olimpo Paiz Recinos', written over a large, empty oval shape.

Guatemala, agosto de 2008



/cc

## ACTO QUE DEDICO A:

Mis padres, por el apoyo incondicional.

Mi esposa, Karina, lo más importante de mi vida.

Mi hermana, por el ejemplo de estudiante.

## AGRADECIMIENTOS

Facultad de Ingeniería, por la formación académica.

Mi asesora, Inga. Miriam Mencos, por su valiosa asesoría.

Amigos en general, que siempre estuvieron pendientes de mi formación académica.



# ÍNDICE GENERAL

<b>ÍNDICE DE ILUSTRACIONES</b>	V
<b>RESUMEN</b>	VII
<b>OBJETIVOS</b>	IX
<b>INTRODUCCIÓN</b>	XI
<b>1. CARBÓN ACTIVADO Y SUS PROPIEDADES:</b>	
1.1 Antecedentes del carbón activado	1
1.2 Propiedades y aplicaciones	1
1.3 Activación de un carbón	2
1.3.1 Proceso de activación	3
1.3.1.1 Proceso Físico	4
1.3.1.2 Proceso Químico	4
1.4 Clasificación	4
1.5 Propiedades para medir la capacidad de adsorción	6
1.5.1 Propiedades Químicas	6
1.5.2 Propiedades físicas	7
<b>2. APLICACIONES DEL CARBÓN ACTIVADO</b>	
2.1 Purificación en fase líquida	9
2.1.1 Variables que afectan la adsorción en fase líquida	10
2.1.1.1 Temperatura	10
2.1.1.2 pH	10
2.1.1.3 Tamaño de partícula del carbón	11
2.1.2 Pureza de un carbón: cenizas	11
2.1.3 Carbón granular	12
2.2 Purificación en fase gaseosa	13
2.2.1 Los parámetros de los Carbones activados en Fase Gas.	14
2.3 Tipos de regeneración de carbón granular	15
2.3.1 Regeneración por vapor	15

2.3.2	Regeneración termal	15
2.3.3	Regeneración química	16
2.3.4	Extracción con fluido supercrítico	16

### **3. FUNCIONAMIENTO DE LOS TIPOS DE REGENERACIÓN DE CARBÓN ACTIVADO GRANULAR EXHAUSTO**

3.1	Regeneración por vapor	17
3.1.1	El funcionamiento	17
3.1.2	Las especificaciones de la cámara	18
3.2	Regeneración térmica	19
3.2.1	Funcionamiento	20
3.2.2	El beneficio de la regeneración térmica	21
3.2.3	Las desventajas	22
3.2.4	Tipos de hornos de regeneración térmica	23
	3.2.4.1 Horno de múltiple hogar o etapa	23
	3.2.4.2 Horno rotatorio	27
	3.2.4.3 Horno de regeneración vertical de lecho fluidizado	28
	3.2.4.4 Materiales de construcción de los diferentes hornos	29
3.3	Fluido supercrítico	31

### **4. ANÁLISIS DE FACTIBILIDAD ECONÓMICA DE LA REGENERACIÓN EN UN HORNO DE MÚLTIPLE ETAPA**

4.1	Macroanálisis	36
4.2	Microanálisis	36
4.3	Búsqueda de alternativas de solución	37
4.4	Selección preliminar	37
	4.4.1 Selección de horno de regeneración	38
4.5	Desarrollo de la alternativa, Horno de múltiple hogar	43
	4.5.1 Análisis de la eficiencia de la regeneración del carbón activado granular.	45

4.6	Costos en regeneración térmica por un horno de múltiple etapa.	49
	<b>CONCLUSIONES</b>	55
	<b>RECOMENDACIONES</b>	57
	<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	59
	Anexos	61
	Anexo A: Descripción y diagrama del equipo	

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURA

Figura 1.	Diagrama de los balances de masa en un horno de múltiple hogar.	44
-----------	---	----

### TABLAS

I.	Cantidad de masa al inicio del ciclo, después de la recolección (humeda) y cantidad obtenida después de la regeneración (seco); muestra 1.	45
II.	Propiedades fisicoquímicas del carbón en el ciclo regenerativo 1, muestra 1.	45
III.	Propiedades fisicoquímicas del carbón en el ciclo regenerativo 2, muestra 1.	46
IV.	Propiedades fisicoquímicas del carbón en el ciclo regenerativo 3, muestra 1.	46
V.	Propiedades fisicoquímicas del carbón en el ciclo regenerativo 4, muestra 1.	46
VI.	Cantidad de masa al inicio del ciclo, después de la recolección (humeda) y cantidad obtenida después de la regeneración (seco); muestra 2.	47
VII.	Propiedades fisicoquímicas del carbón en el ciclo regenerativo 1, muestra 2.	47
VIII.	Propiedades fisicoquímicas del carbón en el ciclo regenerativo 2, muestra 2.	47
IX.	Propiedades fisicoquímicas del carbón en el ciclo regenerativo 3, muestra 2.	48
X.	Propiedades fisicoquímicas del carbón en el ciclo regenerativo 4, muestra 2.	48

XI.	Especificaciones del equipo para una capacidad de 2000 lb./día	51
XII.	Especificaciones del equipo para una capacidad de 2000 lb./día, con su costo actual.	54



## RESUMEN

El estudio realizado tiene como objetivo encontrar si es factible y económica la regeneración de carbón activado granular exhausto, para un consumo promedio de 250TM al año en el área de Centroamérica.

El modo de comparar si es rentable la regeneración se dará a partir de la comparación de las propiedades adsorbentes del carbón activado virgen, exhausto y regenerado. El modo de comparación se encontrará por el conocimiento de un fluido (jarabe de azúcar a 60° Brix); se comparará el % de decoloración y olor que logra retirar.

Se utilizarán las siete etapas de diseño (microanálisis, microanálisis, creación de alternativas, selección preliminar, desarrollo de la alternativa, evaluación económica, presentación técnica) para determinar cuántas veces puede ser regenerado el carbón activado exhausto antes de dejar de ser útil, es decir que no pierda en gran cantidad sus cualidades absorbentes; así como sea factible económicamente la regeneración.

Para poder evaluar la utilidad del horno de múltiple etapa (en donde se evaluará la factibilidad de la regeneración de carbón activado), se describirá el análisis económico respecto al desecho del carbón activado granular exhausto, el costo de la regeneración; obteniéndose el beneficio/costo del proceso.

En la última etapa de diseño de equipo se obtendrá si es factible el utilizar el horno (rentabilidad económica) y cualidades del carbón al ser regenerado (comparándolo cuantitativamente contra la capacidad de adsorción del carbón virgen), así como sus limitaciones.

## OBJETIVOS

- **General**

Realizar un estudio de factibilidad de la regeneración de las propiedades adsorbentes del carbón activado granular; con una capacidad de 250 TM/año.

- **Específicos**

1. Comprobar que las propiedades fisicoquímicas del carbón activado se mantienen al ser regenerado.
2. Determinar el número de veces que puede ser regenerado el carbón activado sin perder 7.5% en masa de carbón y mantener sus propiedades fisicoquímicas.
3. Determinar el costo de la regeneración de carbón activado granular por medio de un horno de múltiple hogar, para un consumo de 250TM.
4. Comprobar que puede ser rentable el regenerar carbón activado granular exhausto.



## INTRODUCCIÓN

El principio de tratamiento de fluidos con materiales carbonosos, para eliminar impurezas, olores y sabores; se ha extendido a los procesos municipales e industriales, incluyendo bodegas, cervecerías, el proceso de pasta y papel, las industrias farmacéuticas, la alimentación, el petróleo y las aplicaciones petroquímicas, pesticidas, etc.

Dado la amplia aplicación industrial del carbón activado granular, la demanda de él es alta en el mercado, manteniéndose como uno de los insumos primordiales de las industrias.

Se busca el aprovechamiento del carbón activado granular al máximo, regenerándolo hasta que adquiera nuevamente sus propiedades adsorbentes, la mayor de cantidad de veces posible, logrando así un menor gasto en insumos de carbón.

Para validar o innovar una solución es necesario comprobar que es factiblemente económica y químicamente la regeneración de carbón activado por medio de un horno de múltiple hogar, comparando los beneficios que trae el aprovechamiento al máximo de las propiedades adsorbentes del carbón activado (comparación de beneficio/costo).

Se ha dispuesto trabajar con 250TM al año, debido a que éste es el consumo promedio de Carbón Activado Granular para el área Centroamericana (específicamente Guatemala, El Salvador, Honduras y Nicaragua).<sup>1</sup>

Cuando el carbón activado granular queda exhausto, este se desecha creando contaminación ambiental y crea una pérdida económica que puede ser potencialmente descartada. Se sabe que el saco de 55 libras de carbón activado granular tiene un costo de Q800 el saco, y en un total de 250TM se tiene una pérdida de Q 440,000,000 al desechar esta cantidad de carbón granular exhausto.

Dado que existen diversos métodos de regeneración (por vapor, térmico, química, biológica, fluido supercrítico, entre otros) se explicará cualitativamente el uso de regeneración térmica (horno de múltiple hogar) en comparación del método de vapor y fluido supercrítico, para justificar el uso de éste horno en el estudio de factibilidad de la regeneración del carbón activado.

---

<sup>1</sup>Fuente: Comerrsa. Consumo año -2005

# **1. CARBÓN ACTIVADO Y SUS PROPIEDADES**

## **1.1 Antecedentes del carbón activado**

Desde tiempos remotos, los egipcios descubrieron que el carbón de madera podía utilizarse para purificar otros productos e incluso usarse con fines medicinales. En la actualidad, el carbón activado es utilizado para remover color, olor y sabor de una infinidad de productos, por lo cual lo podemos encontrar en aplicaciones tan sencillas como peceras o filtros de refrigerador, hasta complejos sistemas industriales como modernas plantas de tratamiento de aguas residuales o delicados sistemas de elaboración de antibióticos.

## **1.2 Propiedades y aplicaciones**

Es conveniente analizar primero el proceso de adsorción, para así comprender mejor como es que el carbón activado realiza su función. La adsorción es un proceso por el cual los átomos en la superficie de un sólido, atraen y retienen moléculas de otros compuestos. Estas fuerzas de atracción son conocidas como " fuerzas de Van Der Waals". Por lo tanto, al ser un fenómeno que ocurre en la superficie mientras mayor área superficial disponible tenga un sólido, mejor adsorbente podrá ser.

El carbón activado es un producto que posee una estructura cristalina reticular similar a la del grafito; es extremadamente poroso y puede llegar a desarrollar áreas superficiales del orden de 1,500 metros cuadrados o más, por gramo de carbón.

Todos los átomos de carbón en la superficie de un cristal son capaces de atraer moléculas de compuestos que causan color, olor o sabor indeseables; la diferencia con un carbón activado consiste en la cantidad de átomos en la superficie disponibles para realizar la adsorción. En otras palabras, la activación de cualquier carbón consiste en " multiplicar" el área superficial creando una estructura porosa. Es importante mencionar que el área superficial del carbón activado es interna. Para darnos una idea más clara de la magnitud de la misma, imaginemos un gramo de carbón en trozo el cual moleremos muy fino para incrementar su superficie, como resultado obtendremos un área aproximada de 3 a 4 metros cuadrados, en cambio, al activar el carbón logramos multiplicar de 200 300 veces este valor.

Por todo ello, cuando se desea remover una impureza orgánica que causa color, olor o sabor indeseable, normalmente la adsorción con carbón activado suele ser la técnica más económica y sencilla.

### **1.3 Activación de un carbón**

Las características específicas de los distintos tipos de carbones activados dependen principalmente de:

- a) La materia prima

#### b) El proceso de activación utilizado

Es importante mencionar que una misma materia prima que sea activada por procesos diferentes dará como resultado carbones con propiedades diferentes.

### 1.3.1 Proceso de activación

El proceso de activación consiste básicamente en reordenar los átomos de carbono en anillos tipo benceno para lograr una estructura cristalina reticular similar a la del grafito, en otras palabras, la activación consiste en "multiplicar" la cantidad de poros de un carbón dando como resultado una estructura extremadamente porosa de gran área superficial disponible para llevar a cabo el proceso de adsorción de impurezas que provocan olor, color o sabor indeseable.

Los principales procesos de activación:

Existen básicamente dos procesos a través de los cuales se puede lograr la activación:

- a) Proceso Físico
- b) Proceso Químico

Se dispone de carbones activados por medio de ambos procesos y a partir de diferentes materias primas para una extensa gama de aplicaciones.

### 1.3.1.1 Proceso Físico

La activación física consiste en oxidar la materia prima a altas temperaturas en presencia de un agente oxidante, usualmente, vapor de agua. Debido a que la reacción es endotérmica es necesario generar una temperatura constante, normalmente y dependiendo de la materia prima, ésta es de 800 °C.

### 1.3.1.2 Proceso Químico

La activación química se basa en la deshidratación de la materia prima, mediante sustancias químicas y a una temperatura media (400 a 600 °C.), ésta depende de la sustancia química a utilizar para activar el carbón. Los agentes químicos normalmente utilizados son el ácido fosfórico, el cloruro de zinc y el ácido sulfúrico.

## 1.4 Clasificación

En términos generales, los carbones activados se clasifican en dos grandes grupos:

- Carbones para purificación en **FASE LÍQUIDA.**
- Carbones para purificación en **FASE GASEOSA.**

Las propiedades más importantes a considerar al seleccionar un carbón son el diámetro de los poros y las características de los mismos. Los poros de un carbón activado se clasifican en tres, de acuerdo a su tamaño:

- Microporos
- Poros medios
- Macroporos.

Los microporos son poros con un radio de 20 Å o menos y son los que más área proporcionan. Son útiles para adsorber moléculas muy pequeñas, que generalmente se encuentran presentes en purificaciones de gases.

Los poros medios están en el rango de 20- 500 Å y aunque su contribución al área total es menor que los microporos, su tamaño les permite adsorber moléculas grandes que por lo general están presentes en purificaciones de líquidos.

Los Macroporos casi no contribuyen al área total de un carbón pero su importancia radica en que actúan como Vías de acceso a los poros medios y microporos, afectando la velocidad de Difusión de las impurezas en el carbón.

Desafortunadamente el área total y el tamaño de los poros no son fáciles de medir, y en consecuencia se suelen utilizar algunos índices como:

- El índice de yodo.
- El índice de melaza.
- El índice de azul de metileno.
- El índice de tetracloruro de carbono.
- El índice de butano.

Estos índices nos dan una idea de que tan fácil se adsorben las moléculas de distintos tamaños, por lo que podemos darnos una idea del tipo de poros que tiene un carbón.

Normalmente es difícil que un carbón tenga poros de un solo tamaño, lo que tiene es una determinada distribución.

Cuando la media se inclina hacia los microporos se dice que el carbón es de "fase gaseosa"; en caso contrario, el carbón será para "fase líquida".

## **1.5 Propiedades para medir la capacidad de adsorción.**

### **1.5.1 Propiedades Químicas**

a) **CAPACIDAD DE DECOLORACIÓN %:** es un parámetro que mide la habilidad de un carbón para adsorber impurezas de tamaños medianos o grandes, moléculas que dan color (meso y macroporos). A mayor el porcentaje, mayor la capacidad de adsorción del carbón.

b) **NÚMERO DE MELAZAS:** es una medida relativa de la capacidad de decoloración que tiene un carbón activado específico. Y se mide mediante la relación de melazas adsorbidas por gramo de carbón activado.

c) **NÚMERO DE YODO:** mide los mg l/ g de carbón adsorbidos de una solución a 0.1N de yodo. Su interpretación es la capacidad del carbón de adsorber moléculas de tamaño pequeño (o cantidad de microporos).

d) **pH DEL AGUA EXTRAIDA:** Una muestra de 20 gramos, base seca, de carbón es mezclada con 200 ml de agua destilada. Se deja en agitación y calentamiento por una hora. Luego se succiona el líquido y se enfría a temperatura ambiente, se lee el pH con un potenciómetro. Es útil para conocer el pH que el sólido puede transmitir en el líquido medio. Además puede inferir en el contenido y tipo de impurezas en el carbón.

e) **% DE ASH (ceniza):** una muestra de 5g de carbón seco se mezclan con 100 ml de agua destilada y 25 ml de ácido hidrocloreídrico , se calienta hasta

ebullición por 5 min. Luego se obtiene el carbón y se seca en un horno para obtener una torta de carbón.

#### 1.5.2 Propiedades físicas

a) **NÚMERO DE ABRASIÓN:** en un equipo especial de laboratorio (RoTap), se colocan 100 ml de carbón tamizado. Se agita por 30 minutos. Se mide la diferencia entre el diámetro inicial y el diámetro final promedio de las partículas de carbón. Es una medida de la dureza de las partículas de carbón. Este parámetro es muy importante para el GAC, pues es necesario saber si es lo suficientemente duro para no corroerse el mismo dentro del cuerpo del filtro del proceso de clarificación.

b) **TAMAÑO DE PARTÍCULA:** se trata simplemente de medir con un dispositivo adecuado el diámetro de la partícula de GAC. (Distribución del tamaño de partícula, granulometría).

c) **DENSIDAD:** se alimenta un cilindro vibratorio calibrado a 100 ml con una muestra de carbón granular, a 1ml/seg o menos. El peso de la muestra se divide en el volumen medido en el cilindro, y se hace corrección por humedad.

La carga de impurezas del GAC exhausto puede variar grandemente, pues depende de los procesos a los que ha sido expuesto en las diferentes industrias. En algunos casos el GAC puede adsorber del fluido que trate, hasta

un 50% de su propio peso<sup>2</sup>. En otros casos, como en el tratamiento de olores y sabores de agua de algún pozo común, el GAC puede quedar exhausto con solo un 10% de su peso original.

La clave de una regeneración exitosa prevalece en la capacidad de selección de los tipos de GAC a ser regenerados.

Para analizar la factibilidad de regeneración de las 250 TM/año de GAC, que se utilizan en los países de Guatemala, El Salvador, Honduras y Guatemala, se utilizó un horno de laboratorio para reactivar diferentes tipos de carbón activado exhausto y analizar los resultados de las propiedades fisicoquímicas antes y después del tratamiento.

---

<sup>2</sup> Westvaco, Corporation. Techniques of Activated Carbon Regeneration. Pp.: 12.

## 2. APLICACIONES DEL CARBÓN ACTIVADO

### 2.1 Purificación en fase líquida

La adsorción con carbón en FASE LÍQUIDA es útil para remover compuestos orgánicos que causan color, olor y sabor indeseables. Esta técnica es en la mayoría de los casos, la opción más sencilla y económica comparada con otras técnicas, por ejemplo: destilación cristalización, etc.

Aunque la mayor parte de los compuestos que adsorbe el carbón activado son de naturaleza orgánica, existen algunas importantes excepciones inorgánicas.

La adsorción en la **FASE LÍQUIDA** es resultado de dos fenómenos:

- a) **Adsorción Física:** debida a las fuerzas de Van Der Waals.
- b) **Adsorción Química:** debida a la formación de enlaces químicos

Es importante mencionar que la adsorción en **FASE LÍQUIDA** es el resultado de un equilibrio entre la adsorción y desorción, en consecuencia, es un fenómeno complejo que puede verse influenciado por muchas variables.

## **2.1.1 Variables que afectan la adsorción en fase líquida**

En términos generales, las variables más importantes que afectan la adsorción son:

Temperatura, P.H. Y tamaño de partícula.

### **2.1.1.1 Temperatura**

Una mayor temperatura generalmente permite llegar al equilibrio más rápidamente; sin embargo, la cantidad de impureza adsorbida es menor. Esto quiere decir que si el tiempo no fuera importante, se podría lograr una mayor adsorción a menor temperatura; lo cual rara vez es práctico a nivel industrial, por lo que aumentar la temperatura- cuando es posible- normalmente resulta benéfico.

### **2.1.1.2 pH**

Muchos compuestos que provocan color, varían su estructura y su color al cambiar el pH. En la mayoría de los casos la decoloración a pH más bajos es más eficiente por 2 razones:

Los compuestos que generan color normalmente tiene una alta dependencia con el pH, siendo menos intenso a pH menor. Posiblemente la adsorción es más eficiente a pH más bajo. Cuando se tiene certeza del

comportamiento, es mejor no modificar el pH y buscar un carbón activado con pH cercano al proceso.

### **2.1.1.3 Tamaño de partícula del carbón**

Como ya se mencionó, el área del carbón es interna y en consecuencia el tamaño de la partícula no tiene efecto sobre la capacidad adsorptiva del carbón. Sin embargo, sí tiene efecto sobre la velocidad para alcanzar el equilibrio. Por ejemplo: en una aplicación determinada probablemente se requerirán varias horas de contacto usando carbón granular, para obtener el mismo resultado que se tendría usando carbón pulverizado y 30 minutos de contacto. Las desventajas de una menor partícula son:

En el caso de carbones granulares: *mayor caída de presión*. En el caso de carbones pulverizados: *menor filtrabilidad*.

### **2.1.2 Pureza de un carbón: cenizas**

Las cenizas son compuestos inorgánicos presentes en la materia prima de la cual se partió para elaborar el carbón activado y que no alcanzan a volatilizarse durante la activación.

El contenido de cenizas suele asociarse con la calidad de un carbón; sin embargo, esto no es del todo cierto, ya que en realidad lo importante es la parte de las cenizas que es soluble en el producto que se está purificando.

En muchas aplicaciones las cenizas no son importantes; sin embargo existen algunos procesos en los que la presencia de compuestos inorgánicos, por ejemplo calcio, magnesio, fierro, etc., pueden ocasionar alguna reacción indeseable.

### 2.1.3 Carbón granular.

Como se ha mencionado, la única diferencia entre un carbón granular y uno pulverizado es el tamaño de la partícula.

De lo que se deriva que, el tiempo requerido para obtener el mismo resultado es mucho mayor con carbón granular, mismo que se utiliza siempre en una columna empacada a través de la cual fluye el líquido. Este tipo de operación es sobre todo recomendable en procesos continuos con una calidad estable del fluido a purificar y grandes flujos. Tiene la ventaja que el carbón se puede regenerar y en consecuencia los consumos son menores.

Es importante recalcar que la capacidad de un *Carbón Granular* es la misma que la de uno *Pulverizado*, por lo tanto, la forma de determinar la facilidad de adsorber una determinada impureza es moliendo el carbón y corriendo en laboratorio **Isotermas de Freundlich**.

Para obtener los parámetros de diseño de una columna (diámetro, altura de carbón, flujo. etc.) es necesario efectuar pruebas piloto. Una forma sencilla de realizar estas pruebas es usando varias columnas en serie de 3 ½ "ó 4" de diámetro.

A manera de guía general, podemos decir que la relación de altura de carbón entre el diámetro de las columnas oscila entre 2 a 1; y 5 a 1 y el flujo

medido como el número de volúmenes de cama de licor que pasan por el carbón en una hora ( V.C.H) oscila entre:

- Decoloración 0.2- 0.6
- Desodorización 1.0-2.0
- Tratamiento 1.0- 4.0

Existen dos variantes de sistema para carbón granular:

- Sistema de lecho móvil.
- Sistema de lecho fijo.

## **2.2 Purificación en fase gaseosa**

Los carbones activados para aplicaciones en fase gaseosa son usados en gran escala, en la purificación de aire, purificación de gases de proceso, recuperación de solventes, protección ambiental y como catalizador.

La naturaleza y concentración del contaminante, junto con las condiciones específicas del proceso determinan qué tipo de carbón debe utilizarse, generalmente debido a que el tamaño de las moléculas de los vapores es relativamente pequeño, se requiere del uso de carbones microscópicos. En algunas aplicaciones, la actividad del carbón es mejorada impregnándolo con agentes catalítico.

La adsorción en fase gas, se lleva a cabo por condensación del vapor, como resultado de la interacción entre la superficie del carbón y el vapor, siendo ésta una reacción exotérmica.

## **2.2.1 Los parámetros de los carbones activados en fase gas**

### **Concentración del Adsorbato**

Solo cuando la corriente de vapor a tratar esté completamente saturada, todos los poros del carbón se llenarán con el adsorbato. Entre más baja sea la concentración del adsorbato solo los microporos más pequeños poseen la energía de adsorción suficiente para adsorberlo.

### **Temperatura de adsorción**

En términos generales a mayor temperatura se reduce la capacidad de adsorción debido a:

#### **a) Contenido de energía**

A mayor temperatura se incrementa el contenido de energía, por lo que el adsorbato requiere de mayor energía para mantenerse en estado líquido, lo que influirá de manera directa en equilibrio de adsorción.

#### **b) Presión de vapor saturado**

A mayor temperatura se incrementa la presión de vapor, por lo que es más difícil mantener al adsorbato en estado líquido.

#### **c) Densidad del Adsorbato**

La densidad del adsorbato disminuye al aumentar la temperatura

### **Naturaleza del Adsorbato**

Mientras más compleja sea la mezcla de adsorbato a tratar con mayor facilidad será adsorbida.

### **Punto de ebullición del Adsorbato**

Entre más alto es el punto de ebullición del adsorbato se requiere de un carbón con mayor grado de actividad.

### **Humedad relativa del carbón**

Una alta humedad relativa conduce a un alto contenido de humedad en el carbón lo que inhibe fuertemente su capacidad de adsorción.

## **2.3 Tipos de regeneración de carbón granular**

### **2.3.1 Regeneración por vapor**

Este método se restringe para la regeneración de carbón el cual ha retenido solamente algunos productos muy volátiles.

### **2.3.2 Regeneración termal**

Pirolisis y quitar con soplete las sustancias orgánicas adsorbidas. En orden de evitar la ignición del carbón, este es calentado sobre unos 800 grados centígrados en una atmósfera controlada, pero tiene dos desventajas: requiere

la inversión considerable de calor en cualquier horno de multiple-calor y causa altas pérdidas de carbón.

### **2.3.3 Regeneración química**

Cierto proceso basado en la acción de un solvente usado a una temperatura aproximadamente de 100°C y con un alto pH.

### **2.3.4 Extracción con fluido supercrítico**

La regeneración se realiza con el anhídrido carbónico supercrítico (sc-CO<sub>2</sub>), perfeccionando el método con respecto a los parámetros ajustables que controlan los procesos, limitando y ganando la visión en el mecanismo de regeneración con fluido supercrítico.

### **3. FUNCIONAMIENTO DE LOS TIPOS DE REGENERACIÓN DE CARBÓN ACTIVADO GRANULAR EXHAUSTO**

#### **3.1 Regeneración por vapor**

Comprende de un soplador regenerativo, una cámara de presión regulada de carbón, un condensador de vapor y un separador donde se alojan algunos sedimentos. Se debe mantener un sistema eléctrico temporal para operar.

##### **3.1.1 El Funcionamiento**

La cámara proporciona el vapor a chorro en retroceso al carbón, eliminando así los contaminantes adsorbidos en los distintos procesos y aplicaciones del carbón (líquido por lo general, dada la aplicación del carbón activado granular). El vapor contaminado se condensa para regar áreas verdes y otros usos convencionales donde no se ocupa agua potable, si este no va contaminado por otros tóxicos; los contaminantes insolubles se reciben en una bandeja en la parte inferior para poder retirarlos y tratados; más abajo se encuentra el desagüe y debe disponerse de según el reglamento ambiental estipulado.

Se estima aproximadamente una duración de una hora de vapor a chorro de agua para quitar los contaminantes del carbono. Una vez completado, el

carbono se permite refrescar con el aire puro antes de que usarse de nuevo para la adsorción. Esta unidad sólo contiene un depósito de carbono para que deba cerrarse completamente fuera durante el proceso de la regeneración. Otras unidades están disponibles que contiene los depósitos duales para que el proceso de adsorción aéreo pueda correr continuamente cambiando un depósito activado y de reserva con las válvulas. El depósito activado se regenera y entonces se vuelve el depósito de reserva.

### **3.1.2 Las especificaciones de la cámara**

El interior de la cámara y en los depósitos de carbono es clasificado, situación que se da por el manejo de los gases inflamables, pero los vapores sólo son riesgosos en caso de las condiciones del funcionamiento anormales. El equipo es completamente eléctrico; no guarda altas presiones, evitando ser explosivo; es intrínsecamente seguro dado su construcción antiexplosión, que es un metal con una capa gruesa, por un funcionamiento anormal. Se mantendrá la temperatura de la cámara alrededor de 40 grados Fahrenheit, mientras se conecta el calentador a la energía eléctrica.

Frecuentemente se utiliza una cámara con las siguientes especificaciones: Un condensador capaz de manejar todo el vapor utilizado en la regeneración, un soplador regenerador de 2.0 HP, La cámara de presión regulada con 950 lbs. de carbón.

Debe tener también un vacío seguro y sensores de presión así como de temperatura; un tambor de colección de agua de condensación

Optativamente pueden tener: Sensores de descarga, funcionamiento automático (automatización), comunicación por módem.

### **3.2 Regeneración térmica**

El uso de materias primas diferentes (el ej., carbón, madera y el coco descascara) y procesando las técnicas ha producido un rango de tipos del carbono, en los dos empolvados y las formas granulares. Estos tipos tienen varias características de adsorción que tienden a hacerlos bien satisfechas para las aplicaciones medioambientales específicas. El carbón activado granular (GAC) normalmente es la mayoría usado para el levantamiento de una gama amplia de compuestos orgánicos tóxicos del agua subterránea contaminada, agua de residuo industrial, y fase de vapor los flujos desechados.

El carbón activado exhausto a desechar puede ser clasificado en una variedad de posibles categorías, incluyendo la categoría de peligroso y no peligroso o contaminante. El manejo y disposición de carbón activado exhausto pueden proponer una carga económica y logística significativa en el generador de desecho. Los incentivos por reciclar de carbón activado exhausto y reconstituir sus propiedades incluyen los beneficios financieros y las obligaciones reducidas asociadas con manejo impropio o disposición de carbón activado exhausto a desechar.

Actualmente se ofrecen servicios para reciclar carbón activado exhausto, como parte de un arreglo de servicio o como un servicio autosuficiente en una industria; dependiendo de la cantidad de carbón producida por la misma industria. El servicio específico depende de factores como las características del carbón activado granular, el sistema de tratamiento, el volumen de carbono gastado ser manejado, y las capacidades seleccionadas. Deben cuantificarse las pérdidas del carbón gastado en el transporte a granel (camión, automóviles, tren, etc.) o empaque (tambores o los recipientes alternativos). El carbón a

regenerar utiliza un sistema termal, que destruye los contaminantes orgánicos, e inorgánicos dejando listo al carbón para reutilizarse.

Algunos vendedores del servicio, ofrecen la regeneración de carbón activado, manejando los lotes segregados de cada cliente, restituyéndoselo. Otra forma de trabajo es obtener el desecho de las empresas de carbón activado granular exhausto y regenerarlo para después venderlo; o bien colocar el sistema dentro de la planta. Este proceso es de importancia para quienes busquen minimizar disposición de desechos con otras basuras no identificadas de otras fuentes.

### **3.2.1 Funcionamiento**

La regeneración trabaja de la siguiente forma:

#### 1) El paso secante

Consiste en colocar el activado a un deshidratador, a la temperatura de 30°C-100°C.

#### 2) Paso de cocimiento

La evaporación, gasificación y cocción de sustancia adsorbida se lleva a cabo entre las temperaturas de 100°C-800°C.

#### 3) Reactivando

En la reactivación de carbón, ya se descompuso y oxidó las impurezas dentro del carbón en el paso de la cocción, en presencia de vapor.

Existen varios tipos de hornos para la regeneración de carbón activado granular exhausto, entre los cuales se pueden mencionar: El horno rotativo, el de cama fluidizada y el múltiple etapa.

### **3.2.2 El Beneficio de la regeneración térmica**

El carbón activado reciclando (al cual se le extrajeron sustancias tóxicas) puede ayudar a los medios a reunir los requisitos de reducción de desechos tóxicos bajo las normas ambientales. Si el carbón activado exhausto es el que no tiene sustancias tóxicas ayuda a la disposición de desechos sólidos.

Otro beneficio es la menor inversión en carbón activado virgen si se trata de una industria que posee su propio horno de regeneración de carbón activado granular virgen. En el caso que sea una empresa que recolecta y regenera el carbón su beneficio se ve o se atrae en la venta del carbón.

Los materiales de construcción no son reactivados con el carbón activado en el momento de regeneración

#### **La Seguridad y Salud**

El carbón activado puede contener impurezas tóxicas, las cuales pueden causar irritación de los ojos, la piel, y membranas mucosa. Se recomienda que el operador del horno utilice equipo de protección personal apropiado, máxime si se trata de carbón exhausto que pudiera contener desechos tóxicos. El equipo debe constar de guantes, lentes de seguridad, mascarilla con carbón activado y ser operado por un especialista o una persona capacitada para llevar a cabo esta tecnología.

## OTROS BENEFICIOS

Elimina el costo de disposición y manejo de desechos sólidos, en especial los tóxicos al exterior.

Significativamente reduce el volumen de carbono virgen que debe comprarse para utilizarse en las distintas aplicaciones industriales existentes.

### **3.2.3 Las desventajas**

La regeneración de carbón activado pulverizado no es típicamente práctica.

Si el carbono es contaminado con PCBs, dióxidos, metales pesados, o DCBP (el diclorobromopropano), la regeneración no puede ser una opción.

El empaquetamiento especial puede requerirse si el carbono tiene ciertas propiedades químicas (por ejemplo, 2 <Ph>11, el haluro y contaminación de azufre, etc.)

Las pérdidas durante la reactivación de iguales del carbón 15%. Esta pérdida es compensada con carbón virgen cuando, de la misma cantidad regenerada es necesaria para una actividad comprendida por el usuario. La labor y coste de carga son el mismo para carbón virgen y regenerado

### **3.2.4 Tipos de hornos de regeneración térmica:**

Existe una gran variedad de hornos para regeneración termal, éstos se diferencian en su capacidad calorífica, cantidad de carbón a tratar y su tipo de funcionamiento. Entre los más destacados se tienen: el horno rotatorio, de múltiple hogar o etapa y de cama fluida.

#### **3.2.4.1 Horno de múltiple hogar o etapa**

La reactivación eficaz del carbón activado granular exhausto mantiene el incentivo económico escogiendo el carbón activado como un proceso purificador. Con el alto costo del carbón activado granular virgen, la regeneración resulta eficaz; pues es necesaria para reducir costos de insumos, disminuir el impacto ambiental del desecho sólido y puede fomentarse como un servicio a prestar. El diseño de la unidad de regeneración de carbón son innovadoras, de forma tal que logran pérdidas mínimas de carbón asegurando el ahorro en el costo del carbón virgen.

El preciso control de la temperatura, vapor y combustión del combustible minimiza la pérdida del carbón y asegura la calidad de éste. Las impurezas en el carbono activado granular exhausto pueden ser carbonizadas o servir de combustible para proporcionar calor al proceso.

El uso dominante del Horno de múltiple hogar o etapa, en las instalaciones de reactivación de carbón se ha dado durante mucho tiempo por su efectividad en el proceso y su beneficio en el costo.

El Horno de múltiple hogar o etapa ofrece ventajas significantes. Proporciona el contacto de sólido-gas íntimo, mantiene el control de

temperatura interna, y rinde en condiciones de funcionamiento uniformes y resultados consistentes.

La transferencia de calor ocurre a través de la radiación de llama directa y contacto del material/gas. Los gases calientes de combustión se aplican en contracorriente al flujo del material. El contacto entre el gas y el carbón exhausto ocurre en cada hogar o etapa, durante todos los hogares o etapas. La eficiencia del combustible de alimentación mejora con el número de hogares utilizados.

Reciclando el aire caliente con intercambiadores que recuperen el calor, se puede mejorar la eficiencia del consumo de combustible.

El proceso es controlado a través de la velocidad del flujo de aire caliente. Éste se maneja a través de una transmisión de velocidad variable, que puede automatizarse para cambiar las velocidades con las variaciones en la humedad de la alimentación o peso, es decir las variables de entrada.

## **Especificaciones**

El Horno de múltiple hogar o etapa consiste en una serie de hogares redondos, dispuestos uno sobre el otro en una coraza metálica de acero dentro de un eje refractor. El eje vertical con capacidad de rotar a través del centro del horno, porta las herramientas en forma de hojas que revuelven el carbón del proceso y lo mueven en un camino espiral por cada hogar. El material se introduce a cada hogar desde la cima, y al girar pasar a través de los agujeros de la gota al siguiente hogar que se encuentra debajo.

El carbón pasa a través de cada hogar, llegando al fondo de este y descargándose en el siguiente, durante los hogares existentes. Los gases

calientes fluyen en contracorriente elevando la temperatura de reacción para llevar a cabo el proceso. El calor se proporciona por la combustión de cualquier material que sirva como combustible (derivados del petróleo, impurezas extraídas en procesos anteriores o materia con poder calorífico), dependiendo del tipo de combustible, su costo y poder calorífico se depositan en el tanque principal o el auxiliar. El calor es transferido por la combustión del combustible, dependiendo de su requisición, del tanque principal o auxiliar, la combustión puede ocurrir en cualquier hogar directamente (el encendido directo), o en una cámara separada (el encendido indirecto).

Cada hogar forma una cámara distinta donde pueden variarse las condiciones del proceso. Pueden aplicarse calor, vapor, y agentes reductores selectivamente para controlar un proceso. Las diferentes etapas del proceso son secar, calcinar, incinerar y enfriar pueden realizarse simultáneamente en el horno.

### **Controles**

Los instrumentos avanzados y técnicas del mando proporcionan un sistema de máxima eficiencia, si no se posee automatización, el operario debe estar pendiente de cada uno de los parámetros. Todas las condiciones críticas afectan el funcionamiento del horno y deben supervisarse, automáticamente si se posee la automatización del proceso y puede controlarse para prevenir el detener el equipo; el cual conlleva a una pérdida de calor, es decir combustible.

### **La flexibilidad**

Uno de las cualidades del Horno de múltiple Hogar o etapa, es su habilidad de controlar y desechar las distintas características físicas y químicas

que posee el carbón activado granular exhausto dependiendo del proceso en que fue utilizado. Otra ventaja es que puede utilizar muchos combustibles, incluso el embrague electromagnético, gas como el propano, butano, aceite y polvo de carbón, así como los aceites inútiles y solventes. También pueden utilizarse residuos de los contaminantes del carbón.

La adaptabilidad del horno puede llevar la adaptación según la necesidad, pues puede operar en modo continuo o intermitente y puede diseñarse con flujo ascendente, descendiente o modelos de flujo en cruz para proporcionar las el ambiente de proceso óptimo.

## **LAS VENTAJAS**

Las amplias condiciones de regeneración que puede procesar gracias a una flexibilidad extrema, las condiciones son referentes al tipo de contaminantes e impurezas que existen dentro del carbón activado granular exhausto.

Al horno pueden hacerse variaciones estructurales para acomodar el funcionamiento bajo condiciones especiales.

Permite tratar productos que requieren temperatura controlada y tiempo de contacto específicos para poder ser funcional el proceso.

Dada su propiedad de colocar el calor en el hogar requerido da como resultado ahorro energético y un proceso eficaz. Es necesario recalcar que esta función se da en un horno automatizado e industrial, es decir, de tamaños grandes.

El carbón puede ser introducido en la cima del horno o en el hogar deseado, según la disposición y resultado requerido.

Los gases del proceso pueden retirarse dondequiera que sea conveniente.

Tiene una alta durabilidad, gracias a los materiales de construcción y las fuerzas que estos resisten; puesto que su movimiento es mínimo los esfuerzos de corte se limitan a las presiones dentro del proceso, evitando el desgaste de tornillos, coplas, juntas, etc.

#### **3.2.4.2 Horno rotatorio**

Para aplicaciones que requieren la calefacción directa, tal como la regeneración de carbón activado granular exhausto, se aplica el horno rotativo.

El horno rotativo de consiste en una coraza de acero cilíndrica. El cilindro es liso en el interior, asegurando así instalación apropiada del forro de ladrillo, el espesor depende en los requisitos del proceso (cantidad de carbón por lo general). El cilindro está sujeto en ambos extremos por capuchas que también son de metal con ladrillo refractor.

El cilindro está horizontalmente montado, apoyado por rollos sistemáticamente con forma de tornillos gigantes, se controla a través del cinturón en la rotación del cilindro o por la fricción de los cuatro tornillos. Las juntas especiales entre el cilindro rotativo y las capuchas estacionarias previenen infiltración de aire atmosférico y evitar pérdidas de calor o ineficiencias del sistema, que conllevan a un costo adicional no esperado.

El específico diseño en las juntas depende de la temperatura activa del horno en el proceso (entre 800°C y 900°C). De una forma semejante trabajan los hornos con sistemas caloríficos indirectos y secadores rotativos.

En la mayoría del material de los casos, el horno se alimenta a través de una cascada hecha de aceros aleados resistente al calor o con un tornillo transportador (principio de tornillo sin fin). Se construyen los hornos rotativos en los tamaños de 0.7 a 3.7 metros el diámetro exterior de la carcasa y 4.5 a 27 metros de longitud; estas variaciones dependen del flujo a utilizar y el tamaño que convenga por las dimensiones del lugar donde será colocado el horno.

Estos hornos pueden encenderse con equipo para combustión de gas o aceite y provistos de controles automáticos (automatización del proceso). Los hornos pueden colocarse en paralelo o funcionamiento en contracorriente.

La capacidad y dimensiones de un horno rotativo continuo requieren exigencias mayores por lo cual es necesario tomar en cuenta cada uno de los parámetros de entrada y salida, así como el calor en disposición.

## LAS VENTAJAS

Maneja una amplia gama de temperatura (con lo cual es posible tomar la temperatura que exijan las impurezas que se encuentran dentro del carbón directamente, esto es entre 800 y 900°C).

La gran flexibilidad en el tamaño de la alimentación.

La inversión inicial es más baja en comparación con cualquier otro horno.

Es capaz de operar en flujo en paralelo o contracorriente para satisfacer las necesidades del proceso.

### **3.2.4.3 Horno de regeneración vertical de lecho fluidizado**

La regeneración de carbón activado granular exhausto puede realizarse eficazmente usando el horno de regeneración vertical de lecho fluidizado; éste tiene la capacidad de reconstituir las propiedades de un carbón exhausto en un porcentaje alto. También puede regenerar carbón dañado en su superficie y regenerarlo a carbón granular regular.

La regeneración de carbono activado granular exhausto se realiza dentro de un tubo vertical. Este tubo regenerador está compuesto de un tubo de acero doble a prueba de calor o daños por temperatura, y el carbón activado va en dirección de ascendente a descendentes en el anillo entre el tubo interno y el tubo externo.

En el tiempo en que sucede el paso del flujo, el carbón activado está siendo calentado en su exterior por más de un quemador o calentador, instalados dentro del horno, y cada paso de secado, cocimiento y reactivación (se menciona activar, pero como no es la primera vez realizada se toma como regenerar) se hace continuamente.

La estructura del horno se diseña de tal una manera que el gas generado en cada etapa del curso del proceso, entrará en el horno a través de una apertura proporcionada al tubo externo y entonces, la combustión completa del gas tomará su lugar. La alimentación de vapor es requerida para la activación dentro del tubo interior y acelerará la reacción del vapor de agua en la cama de carbón activado. Este horno tiene ventajas, comparadas con otros tipos de horno de regeneración:

La mínima pérdida de carbón en el proceso de regeneración.

No existe peligro por la generación de contaminación secundaria.  
Su mantenimiento es sencillo y de costo bajo.

Siendo un horno de poco peso y tamaño no toma mucho espacio de instalación.  
El rendimiento térmico en el horno es alto.  
El rango de operación es amplio (referente a la alimentación y contaminantes del carbón activado granular exhausto).

#### **3.2.4.4 Materiales de construcción de los diferentes hornos**

Los distintos materiales utilizados para la construcción de hornos serán identificados según la pieza a utilizar:

##### **Los materiales**

**Los tubos:** El acero al carbón, cobre, cobre-níquel, latón rojo y acero inoxidable

**Accesorios en los tubos:** El acero al carbón, cobre, cobre-níquel, acero inoxidable

**Brazo o aletas lisas:** Aluminio, acero al carbón, cobre, acero inoxidable.

**Configuración de los brazos:** Aluminio, Cobre

**Área de combustión:** Hierro colado, acero al carbón, cobre, cobre-níquel, latón rojo y acero inoxidable

**Las cubiertas:** acero al carbón, acero galvanizado, acero inoxidable

### 3.3 Fluido supercrítico

El carbón activado, un material con la capacidad de adsorción excelente, se usa, entre otras aplicaciones, en los procesos de la purificación de agua para el levantamiento de sustancias orgánicas. Para el carbón activado razonablemente es más se regenerar en lugar de desecharlo, una vez la superficie adsorbiendo es exhausta.

Hasta ahora, la recuperación de la superficie se ha logrado principalmente por la regeneración termal, con las desventajas de demanda de energía alta, la quemadura externa del microporo, así como la pérdida masiva de carbón. Otras posibilidades incluyen la regeneración química y la regeneración biológica, pero estos métodos sólo son aplicables en unas causas especiales.

Durante los recientes años la extracción con fluido supercrítico ha demostrado ser un método alternativo potencial para la regeneración de carbón activado granular exhausto. Se han realizado los experimentos prometedores con las muestras de carbón activado agotadas bajo las condiciones de laboratorio. En estas muestras se investigó qué había sido exhausto bajo " las condiciones del mundo real " en las instalaciones de la purificación de agua. Los objetivos eran intentar la regeneración de cosas, probando con el anhídrido carbónico supercrítico (sc-CO<sub>2</sub>), perfeccionando la regeneración con respecto a los parámetros ajustables que controlan los procesos limitando y ganar la visión en el mecanismo de regeneración fluida supercrítica.

El carbón activado es clasificado según el tipo de materia prima, la magnitud del área, el tamaño, forma, densidad y dureza de las partículas y la naturaleza de la estructura del poro.

Las propiedades de gases bajo las condiciones supercríticas (31°C y 73 bar para el CO<sub>2</sub>) es considerado ideal para extraer las sustancias de una matriz sólida como se requiere para la regeneración de carbón activado granular exhausto. Estos fluidos supercríticos exhiben las densidades similar a los líquidos de trabajo (las fuerzas altas de solventes) y coeficientes de difusión similares a los de gases de trabajo (las características de transporte excelentes); permitiéndoles extraer los contaminantes del proceso en el carbón, incluso los poros más pequeños y cualquier material.

La regeneración del carbón activado exhausto se realiza con un extractor fluido supercrítico que ofrece un microprocesador de control del sistema supercrítico para el sc-CO<sub>2</sub> a las temperaturas superiores a 150°C y presiones que van entre 130 y 450 bar, y un control de temperatura para un flujo variable. Posee también un sistema para la reintegración de al ambiente del gas y un colector de las sustancias extraídas.

La magnitud de regeneración es medida por un método tritrimétrico que se determina por el índice de yodo basado en el miligramo de yodo adsorbido por el gramo de carbón activado. Desde la cantidad adsorbida de yodo depende de la superficie del carbón activado regenerado, siendo posible encontrar una correlación de regeneración con un aumento correspondiente en el índice de yodo.

Se pueden decir que la regeneración con fluido supercrítico de carbón activado granular exhausto no se deben de haber sujetado las muestras a la regeneración termal antes, puesto que las pérdidas en masa pueden superar el 20 %. Las muestras deben estar libres de crecimiento biológico y especies

viejas adsorbidas, y para un proceso óptimo es necesario tener una temperatura alta para la extracción eficaz, densidad alta para la disolución.



#### **4. ANÁLISIS DE FACTIBILIDAD ECONÓMICA DE LA REGENERACIÓN EN UN HORNO DE MÚLTIPLE ETAPA.**

En el capítulo anterior se describieron las formas de regenerar el carbón activado, se decidió realizar el estudio sobre la regeneración en un horno de múltiple etapa.

Se tomó como base para el estudio las “etapas de diseño” para saber si es factiblemente tanto económicamente como proceso la regeneración de carbón activado exhausto por medio del horno de múltiple etapa.

A continuación se utilizarán una secuencia llamada las etapas de diseño de equipo, describiendo su objetivo y la aplicación en el caso del horno de regeneración de carbón activado (la regeneración termal, horno de múltiple etapa).

Es importante recordar que se eligió el horno de múltiple hogar para hacer el estudio de factibilidad, sin embargo se tomaran todas las etapas de diseño para observar como se acomoda la elección del equipo para regenerar carbón activado y comprobar tanto su factibilidad económica así como las propiedades fisicoquímicas del carbón.

El proceso de diseño se divide en 7 etapas:

#### **4.1 Macroanálisis**

En esta etapa se describe a grandes rasgos lo que se desea obtener con el uso del equipo respecto a la actual incógnita o problema.

Para el caso de la regeneración de carbón activado: Se tiene carbón activado granular exhausto de los diferentes procesos (industriales, comerciales, convencionales), por lo general en fase líquida (descrita en el apartado 2.1). Este carbón exhausto puede poseer diferentes tipos de impurezas: tanto tóxicas como no tóxicas, líquidas y/o sólidas. Después del procesamiento con el equipo se desea obtener carbón activado regenerado, esto es con sus propiedades adsorbenes reconstituidas en el mayor porcentaje posible y perdiendo la menor cantidad de masa del carbón activado ingresado al equipo.

#### **4.2 Microanálisis**

En esta etapa del proceso de diseño se describen específicamente las variables de entrada y salida del proceso en el equipo a utilizar.

En el caso de la regeneración de carbón se tiene: Carbón activado granular exhausto (por las diferentes actividades industriales, comerciales y convencionales) con un poder para remover el color de 0 a 1%, el cual no es útil en un proceso de purificación; la cantidad a regenerar es de 250 TM al año, correspondiente al gasto generado en el área de Centroamérica. Después de procesado se desea reconstituir sus propiedades en un mínimo del 90%, es

decir que remueve el color en un 50%. La comparación con el carbón virgen es que este remueve aproximadamente un 55% del color. Estas pruebas se realizan con métodos de espectrofotometría.

### **4.3 Búsqueda de alternativas de solución**

En esta etapa del proceso de diseño se buscan soluciones que satisfagan las variables de entrada y salida descritas en los procesos anteriores (macroanálisis y microanálisis).

Para la regeneración de carbón se consideran como soluciones: la regeneración termal, regeneración de vapor, regeneración con fluido supercrítico, métodos descritos en el capítulo 3.

Es posible aplicar todos los métodos pues todos parten de carbón activado granular exhausto, el cual se quiere regenerar para reconstituir sus propiedades adsorbentes, sin importar la forma de hacerlo. En todos es posible reconstituir como mínimo el 90% las propiedades adsorbentes y regenerar las 250 TM al año, sin importar su tamaño o gasto de energía.

### **4.4 Selección preliminar**

Se realizará una comparación cualitativa entre los hornos capaces de regenerar carbón.

#### **4.4.1 Selección de horno de regeneración**

A continuación se comparará entre el horno rotatorio y el horno de múltiple hogar o etapa:

Se realizó un pequeño análisis cualitativo en el cual se explica como se llegó a la opción del horno de regeneración de múltiple etapa.

Al hablar de la inversión inicial del equipo tenemos que el horno rotatorio tiene un menor costo inicial que el horno de múltiple hogar, consideración que debe ser tomada dentro de las más prescindibles. El costo del horno rotatorio depende en su mayoría del tamaño de éste, en sí del tiempo de residencia del carbón en el proceso; al igual que el número de hogares del horno de múltiple etapa.

El área que ocupa el horno de múltiple etapa es menor que la que ocupa el horno rotatorio y si se dispone de un lugar preciso es más factible aumentar la altura y no el largo, siendo ésta una desventaja del horno rotatorio.

La comparación del combustible entre los hornos: El horno rotatorio, al manejar un amplio rango de temperaturas (superior a los 1200°C), superior a la temperatura que se requiere para regenerar el carbón (entre 800 y 900 °C); tiene una gran pérdida de calor, por ende de combustible. Las impurezas del carbón son incineradas directamente.

El horno de múltiple etapa tiene la propiedad de colocar el calor en el hogar requerido, lográndose un ahorro energético. Además posee la facultad de controlar la temperatura en cada etapa, esto promueve que la energía utilizada sea la justa del proceso. El rendimiento del calor suministrado es más uniforme que el horno rotatorio por el íntimo contacto de sólido-gas.

En ambos casos, pero dada la disposición (de adquirir los desechos de la regeneración) del calor del horno de múltiple etapa, se puede alimentar de combustible con derivados del petróleo, impurezas extraídas.

Tipo de flujos: El horno rotatorio puede funcionar en flujo paralelo o contracorriente, esta capacidad es útil para compensar ciertos requerimientos dados el flujo inicial. El horno de múltiple hogar solo cuenta con flujo en contracorriente. También dentro de los flujos podemos hacer la comparación de su modo de operar (continuo o intermitente): Ésta es una desventaja del horno rotatorio puesto que trabaja en flujos continuos, y para los requerimientos de la regeneración de carbón activado granular exhausto, que la demanda no es constante todo el tiempo siendo éste un impedimento. El horno de múltiple hogar puede adaptarse en modo continuo o intermitente, pues aplicación del calor en los diferentes hogares es controlada así como el tiempo de residencia.

La eficiencia del proceso es buena en los dos hornos, pero sabiendo que tipo de contaminantes posee y que tan desgastada está la propiedad adsorbente del carbón; es posible en el horno de múltiple etapa ingresar el carbón en el hogar que se necesite; en cambio en el horno tiene que pasar a lo largo de él, o sea todo el proceso teniendo más pérdida de materia.

Hacer las comparaciones se determinó que es más factible para el proceso de regeneración de carbón activado granular exhausto el horno de múltiple etapa por su ahorro energético, facultad de control de temperatura, opción a operación intermitente y menor pérdida de materia.

Comparación entre horno de múltiple hogar y horno de lecho fluidizado.

La inversión inicial del horno de lecho fluidizado es mucho menor al estipulado por el horno de múltiple etapa, dado su material de construcción y su tamaño; el costo inicial es una de las cosas más importantes que resalta en este equipo.

El área que ocupa el horno de múltiple etapa es mayor, puesto que el horno de lecho fluidizado es compacto, formado por dos grandes tubos, es posible instalarlo en cualquier lugar, aunque no se haya tomado en cuenta su instalación en una planta ya existente; siendo esta una ventaja abismal del horno de lecho fluidizado sobre el de múltiple etapa.

La comparación del combustible entre los hornos: Al ser tan compacto el horno de regeneración de lecho fluidizado las pérdidas son mínimas, pero es necesario considerar que se compensa con el contacto que llega a ser indirecto en el proceso.

El horno de múltiple etapa como ya se mencionó tiene la propiedad de colocar el calor en el hogar requerido, lográndose un ahorro energético, que sobrepasa cualquier otro método. El rendimiento del calor suministrado es más uniforme que el horno rotatorio por el íntimo contacto de sólido-gas.

Solo el horno de múltiple etapa se puede alimentar de impurezas extraídas en el proceso.

Tipo de flujos: El horno de lecho fluidizado solo opera intermitente mente; cabe mencionar que por más grande que sea éste tipo de horno, no tiene la capacidad de alimentación que el horno de múltiple etapa, por lo cual el en una tanda de alimentación éste horno podría trabajar más de 3 veces. El horno de múltiple hogar puede adaptarse en modo continuo o intermitente, y su alimentación puede ser variable, logrando tratar el flujo para el cual será diseñado.

La eficiencia del proceso es buena en los dos hornos: El mínimo contacto en el horno de lecho fluidizado asegura una menor pérdida de materia, además por su escaso tamaño la uniformidad y eficiencia del proceso es alta. El horno de múltiple etapa también es muy eficiente en el proceso por su control de temperatura y tiempo de residencia.

Ambos hornos poseen una gran facilidad de limpieza, el horno de múltiple etapa por su factibilidad de tener puertas en cada una de las etapas y el de lecho fluidizado por ser tan fácil de desarmar y armar.

El hacerse las comparaciones se determinó que es más factible para el proceso de regeneración de carbón activado granular exhausto el horno de múltiple etapa, dada su facilidad de manejar una alimentación que complazca las 250 TM al año propuestas logrando la misma eficiencia del proceso que en un horno de lecho fluidizado. Cabe mencionar que el ahorro energético del proceso del lecho fluidizado es muy alta, pero al tenerse que repetir varias veces se compensa con el gasto de cualquier otro horno a la escala que se requiere.

#### El hogar Múltiple

- El diámetro exterior: de 1.4 a 8 metro
- Serie de hogares redondos
- Concha de acero refractario alineado, en el diámetro exterior de 1.4 a 8m.
- El eje vertical rotatorio con los brazos y dientes.
- Control de la temperatura y tiempo de contacto o residencia.
- Atmósfera controlada

## El horno rotativo

- El diámetro exterior de 0.4 a 4.5 metro
- Concha cilíndrica de acero horizontal
- Ladrillos alineados en el cilindro (dentro)
- Gran rango de temperatura superior al 1200
- Gran flexibilidad en la alimentación
- Flujo paralelo y contracorriente

## Horno de lecho fluidizado

- Mínima pérdida de carbón en el proceso de regeneración.
- No existe peligro por la generación de contaminación secundaria.
- Su mantenimiento es sencillo y de costo bajo.
- Siendo un horno de poco peso y tamaño no toma mucho espacio de instalación.
- El rendimiento térmico en el horno es alto.
- El rango de operación es amplio (referente a la alimentación y contaminantes del carbón activado granular exhausto).

Ver diagramas en anexos (páginas de la vii a la xi).

#### 4.5 Desarrollo de la alternativa, Horno de múltiple hogar

Al tener la alternativa elegida, horno de múltiple hogar, se desarrolla a profundidad la forma en que trabajará el equipo para poder determinar sus insumos, costos, parámetros de comparación entre carbón activado regenerado y virgen; hallándose así la factibilidad del equipo.

Para restaurar el total de la superficie del carbón a su valor original, cerca de 1 lb de vapor por 1 libra de carbón regenerado debe ser utilizada, con lo que se favorece la reacción endotérmica, necesaria para la regeneración húmeda, y entre 1 y 1.5% de oxígeno en la atmósfera dentro del horno para regular efectivamente los residuos a obtener.

*“El control del horno para obtener condiciones requeridas se logra variando el fuego en el quemador y las ratas de recirculación de gases, para alcanzar las óptimas condiciones cuando se logra gasificar todo el coke sin causar pérdidas de carbón”.*

La ingeniería del horno provee al equipo con sellos especiales, que permiten que exista una presión de  $-0.5''\text{H}_2\text{O}$  lo que garantiza que el secado sea bueno<sup>3</sup>. El sistema se debe mantener hermético por lo que el control de este sistema es sumamente importante. También el control de proceso (tiempo de retención, temperaturas, etc.), mediante el riguroso control en la alimentación del slurry de GAC a tratar o la rotación del cuerpo central del horno (ver figura anterior).

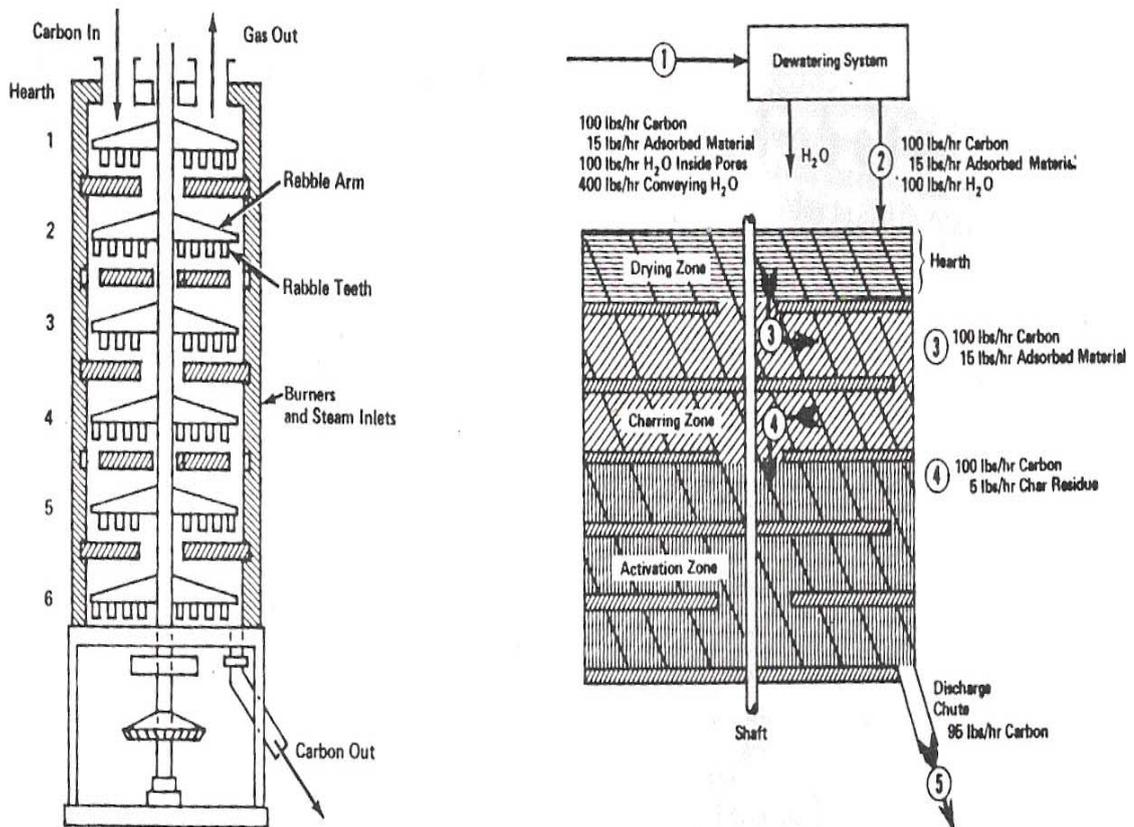
El control del sistema de reactivación se hace necesario por varias razones: el mejoramiento de la eficiencia del proceso, reflejada en una buena combustión

---

<sup>2</sup> El vacío es creado por un ventilador ubicado después de la válvula, pero la presión es regulada por medio de los gases de salida.

y en un buen nivel de reactivación del carbón; la seguridad industrial, debido a que se trata de un proceso que maneja altas temperaturas y que debe ser operado de forma precisa para evitar accidentes de trabajo y, un manejo eficiente de la energía.

**Figura 1. Diagrama de los balances de masa en un horno de múltiple hogar.**



#### 4.5.1 Análisis de la eficiencia de la regeneración del carbón activado granular.

Se realizaron pruebas para determinar cuantas veces puede ser regenerado el carbón activado granular, antes de perder en un gran porcentaje de materia y sus propiedades adsorbentes. Se utilizó agua para “tratamiento de agua” potable para hacer las pruebas; en éstas se compara el carbón activado granular exhausto contra carbón regenerado de 1 a 4 veces observando su comportamiento en relación a la masa que se pierde en cada regeneración y sus propiedades.

A continuación se muestran los resultados de las pruebas.

**Tabla I. Cantidad de masa al inicio del ciclo, después de la recolección (humeda) y cantidad obtenida después de la regeneración (seco); muestra 1.**

<b>Ciclo Regenerativo</b>	<b>Cantidad inicial del ciclo (kg)</b>	<b>Cantidad húmeda (kg)</b>	<b>Cantidad obtenida en seco kg</b>
1	50	80	49.5
2	49.5	79.2	49
3	49	78.4	47.8
4	47.8	76.4	45.9

Fuente: resultados

**Tabla II. Propiedades fisicoquímicas del carbón en el ciclo regenerativo 1, muestra 1.**

	Exhausto	Regenerado	Nuevo
% de decoloración	--	81.5	85.0
Número de Yodo	--	575	600
Densidad aparente	0.44	0.43	0.40
% ceniza	5.0	14.0	3.2
pH	--	5.5	4.8
Tamaño de partícula (micra)	--	1.030	1.100

Fuente: resultados

**Tabla III. Propiedades fisicoquímicas del carbón en el ciclo regenerativo 2, muestra 1.**

	Exhausto	Regenerado	Nuevo
% de decoloración	--	83.0	85.0
Número de Yodo	--	592	600
Densidad aparente	0.46	0.45	0.40
% ceniza	6.7	15.1	3.2
pH	--	5.9	4.8
Tamaño de partícula (micra)	--	1.066	1.100

Fuente: resultados

**Tabla IV. Propiedades fisicoquímicas del carbón en el ciclo regenerativo 3, muestra 1.**

	Exhausto	Regenerado	Nuevo
% de decoloración	--	75.3	85.0
Número de Yodo	--	594	600
Densidad aparente	0.46	0.45	0.40
% ceniza	7.2	13.5	3.2
pH	--	5.8	4.8
Tamaño de partícula (micra)	--	0.995	1.100

Fuente: resultados

**Tabla V. Propiedades fisicoquímicas del carbón en el ciclo regenerativo 4, muestra 1.**

	Exhausto	Regenerado	Nuevo
% de decoloración	--	59.0	85.0
Número de Yodo	--	581	600
Densidad aparente	0.47	0.44	0.40
% ceniza	7.1	13.2	3.2
pH	--	6.0	4.8
Tamaño de partícula (micra)	--	0.990	1.100

Fuente: resultados

**Tabla VI. Cantidad de masa al inicio del ciclo, después de la recolección (humeda) y cantidad obtenida después de la regeneración (seco); muestra 2.**

<b>Ciclo Regenerativo</b>	<b>Cantidad (kg)</b>	<b>Cantidad húmeda (kg)</b>	<b>Cantidad obtenida en seco kg</b>
1	50	80	48
2	48	76.8	47.5
3	47.5	76	46.6
4	46.6	74.5	44.2

Fuente: resultados

**Tabla VII. Propiedades fisicoquímicas del carbón en el ciclo regenerativo 1, muestra 2.**

	Exhausto	Regenerado	Nuevo
% de decoloración	--	75.3	85.0
Número de Yodo	--	585	600
Densidad aparente	0.45	0.42	0.40
% ceniza	6.52	13.20	3.20
pH	--	5.1	4.8
Tamaño de partícula (micra)	--	1.100	1.100

Fuente: resultados

**Tabla VIII. Propiedades fisicoquímicas del carbón en el ciclo regenerativo 2, muestra 2.**

	Exhausto	Regenerado	Nuevo
% de decoloración	--	85.6	85.0
Número de Yodo	--	598	600
Densidad aparente	0.46	0.44	0.40
% ceniza	4.50	8.30	3.20
pH	--	5.9	4.8
Tamaño de partícula (micra)	--	1.090	1.100

Fuente: resultados

**Tabla IX. Propiedades fisicoquímicas del carbón en el ciclo regenerativo 3, muestra 2.**

	Exhausto	Regenerado	Nuevo
% de decoloración	--	82.5	85.0
Número de Yodo	--	598	600
Densidad aparente	0.49	0.44	0.40
% ceniza	7.00	18.50	3.20
pH	--	5.6	4.8
Tamaño de partícula (micra)	--	0.993	1.100

Fuente: resultados

**Tabla X. Propiedades fisicoquímicas del carbón en el ciclo regenerativo 4, muestra 2.**

	Exhausto	Regenerado	Nuevo
% de decoloración	--	80.5	85.0
Número de Yodo	--	590	600
Densidad aparente	0.45	0.47	0.40
% ceniza	7.31	13.50	3.20
pH	--	5.9	4.8
Tamaño de partícula (micra)	--	0.990	1.100

Fuente: resultados

Para explicar los resultados de las dos muestras regeneradas 4 veces es necesario entender y saber las siguientes condiciones para la factibilidad económica (Sección 4.6): Cada vez que se regenera el carbón activado exhausto se tiene una pérdida de masa, dada por la calcinación de la superficie externa de las partículas; por lo cual en el estudio económico se tomo en cuenta esta perdida de masa, la cual será compensada con carbón activado virgen. Se tomo como factible, que la compensación para el caso del horno de múltiple hogar es entre el 5 y el 10 %, pero se sacó el promedio y se utilizará 7.5%.

Con base a que la pérdida máxima, para que sea factiblemente económica la regeneración de carbón activado, es del 7.5% y observando en los resultados la pérdida de masa, se puede observar que la regeneración es viable hasta tres veces sin agregar carbón activado virgen para compensar la perdida.

Es importante resaltar que no solo debe de tomarse en cuenta la pérdida de masa, sino que las propiedades del carbón después de la regeneración; en los resultados encontrados se pudo observar que el desempeño del carbón regenerado vrs el carbón virgen en las muestras de agua es casi semejante, es decir puede utilizarse sin ninguna restricción. Los parámetros encontrados para cada muestra, en cada regeneración (Número o índice de yodo, % de Ash, Densidad, etc.) los cuales describen las propiedades del carbón, se explican en la sección **(1.5 Propiedades para medir la capacidad de adsorción)**.

#### **4.6 Costos en regeneración térmica por un horno de múltiple etapa.**

Si la cantidad de carbón exhausto es menor de 580 lb/día, es generalmente más barato comprar carbón regenerado que regenerarlo o desecharlo (especificación de los fabricantes).

##### Costos de inversión

La tabla 1 muestra el costo estimado del equipo, instalación y costos varios en el horno dependiendo su capacidad. El costo del equipo incluye un tornillo del alimentación, dispositivo de post combustión, limpiador, y mandos además del horno; no incluye la construcción ni el costo del terreno. Los sistemas de 2000 y 3000 lb/día no requieren construcciones de armaduras por

lo cual solo son colocados y asegurados y se estima un costo del 12% y 10.9%, respectivamente, del costo del equipo.

Para la regeneración de 2000 lb/día el horno tiene un diámetro interior de 30 pulgadas, proporcionando una reactivación conveniente. Si el horno tuviera una capacidad menor el carbón caería directo de hogar en hogar, reduciéndose la eficiencia de la regeneración y no lográndose en algunos casos.

Los hornos son justificables pues posee varios diámetros interiores y varios hogares. Las combinaciones de diámetro y número de hogares dan una transferencia de áreas eficaces.

Algunas pruebas han mostrado que el tiempo de reactivación de puede variar ampliamente de 5 a 125 minutos para un carbón activado dado, dependiendo del tipo y cantidad de material del adsorbido. Por consiguiente, es importante conocer la capacidad a regenerar y el tiempo de contacto adecuado.

#### Costos de operación

Para determinar si el carbón activado granular exhausto gastado debe regenerarse en el sitio para reutilizarse, comprar carbón regenerado o desecharlo; debe de hacerse un estudio del costo de operación para regenerar el carbón y comparar los precios, del carbón virgen, comprar carbón regenerado, desechar y regenerarlo.

Los costos de operación deben tomarse en el punto de vista que una industria privada realice la regeneración o una entidad del estado pues frecuentemente se utilizan diferentes métodos para calcular el costo de operación, pruebas de laboratorio, supervisión de la operación, amortización o

depreciación del equipo para obtener el costo total de operación. En nuestro caso tomaremos el punto de vista de industria privada pues tienen los costos de operación más elevados pues no están exentos de ciertos gastos y estiman el retorno del gasto de inversión.

Los factores a utilizar no implican que sean los únicos aplicables, pero para evaluar el presupuesto son razonables.

Estos factores son de hornos disponibles comercialmente, los cuales tienen especificaciones del fabricante y de la operación de regeneración de carbón activado granular exhausto sin importar la capacidad.

El costo de la regeneración térmica del carbón se obtendrá en quetzales por libra de carbón regenerada bajo los términos de la iniciativa privada.

La capacidad del horno de múltiple hogar es de 2000 lb/día aproximadamente trabajando 300 días/año.

**Tabla XI: Especificaciones del equipo para una capacidad de 2000 lb./día**

<b>Insumo</b>	<b>Relación</b>
Vapor (lb vapor/lb carbón)	0.6
Electricidad (KWH/lb)	0.046
Combustible BTU/lb	5200
Trabajo de operación (hombre-h/lb) TO	0.006
Compensación de pérdida de carbón (lb./lb)	0.075
Mantenimiento	5% de la inversión
Suministros de operación	4% del TO
Recuperación Laboratorio y supervisión	105% del TO
Depreciación	línea recta
Seguro	3.5% de la inversión

Fuente: Fabricantes

Explicación de los insumos:

El vapor se suministra haciendo efecto sobre los poros del carbón, en este caso la relación es de 0.6 lb. de de vapor por cada libra de carbón.

La electricidad es medida en KW hora y en este caso la relación es de 0.046 KWH/lb. de carbón. La electricidad es necesaria para los controles del equipo y los motores y bombas que posee. Existe una relación para el requerimiento eléctrico:

$$\text{Requerimiento eléctrico} = 0.015(C/10,000)^{-0.6847}$$

5 onde C es la capacidad (2000 lb/día)

El combustible (bunker C) es el utilizado para elevar la temperatura del horno su relación es de 5200 BTU por cada libra de carbón a regenerar. Es importante saber que el combustible adecuado para la regeneración en porcentaje del total es de 67% y 33% en operación del dispositivo de post combustión.

Su relación matemática es

$$\text{Combustible} = 4,500(C/10,000)^{-0.1092}$$

Donde C es la capacidad (2000lb/día)

El trabajo de operación es realizado por el encargado de operar el equipo. Se ha hecho una relación de tiempo de trabajo o atención por parte del operador, éste es 0.006 hombre-horas/ por cada libra de carbón a regenerar.

La compensación del carbón es la que se agrega por la pérdida en masa que se da en el equipo en el proceso de la regeneración. Para el caso del horno de múltiple hogar es entre el 5 y el 10 %, pero se sacó el promedio y se utilizará 7.5%.

Suministros de operación es relativo al operario del equipo (hombre-hora/lb) y está estipulado entre el 4 y 6% por las empresas. En nuestro caso utilizaremos el 4%.

La supervisión y pruebas de laboratorio serán estipuladas también al o los operarios del equipo en una proporción del 105%. En este factor también se incluye la recuperación de los gastos generales de fabricación, propuestos por la industria, aumentando el costo directo de fabricación, multiplicando por algún factor. En la forma más simple, el costo es obtenido respecto a las horas directas de trabajo de la máquina, obteniéndose un porcentaje que es agregado al costo del producto. Para nuestro caso se optó por un 80% y 25% para supervisión y laboratorio.

Se estipula una depreciación en línea recta, la vida útil promete 10 años según el proveedor.

Se asegura el equipo por parte de los proveedores en un 3.5% del costo del equipo por año.

La inversión inicial, es de aproximadamente 900,000 euros, aproximadamente Q 9,360,000. Incluye instalación y todos los materiales de construcción necesarios.

**Tabla XII: Especificaciones del equipo para una capacidad de 2000 lb./día, con su costo actual.**

<b>Insumo</b>	<b>Relación</b>	<b>Costo actual</b>	<b>Total</b>
Vapor (lb carbón/lb vapor)	0.6	Q 0.021892	0.01314
Electricidad (KWH/lb)	0.046	Q 0.18	0.00828
Combustible BTU/lb (141,000 btu/gal)	5200	Q 13.5/gal	0.49787
Trabajo de operación (hombre-h/lb) TO	0.006	Q 50/h	0.30000
Compensación de pérdida de carbón (lb./lb)	0.075	Q 14.5/lb	1.08750
Mantenimiento	5% de la inversión	9360000	0.78
Suministros de operación	4% del TO	4% del TO	0.01200
Laboratorio y supervisión	105% del TO	105% del TO	0.31500
Depreciación	línea recta	línea recta	1.56
Seguro e impuestos locales	3.5% inversión	3.5% inversión	0.546
		<b>Total</b>	<b>5.11979</b>

Fuente: Costos en Guatemala

Se desea una tasa de retorno del 30%, incluyendo las ganancias y el precio tope de venta del carbón activado regenerado.

$$\text{COSTO TOTAL} = (\text{Q } 5.12) * (1.3) = \text{Q } 6.65$$

Al comparar con el precio del carbón activado virgen que es de Q 14.5, se tiene que el proceso es rentable pues existe una diferencia de Q 7.85 en utilizar carbón regenerado.

## CONCLUSIONES

1. Regenerar el carbón activado no afecta las propiedades fisicoquímicas (capacidad adsorbente), aún hasta la cuarta regeneración.
2. El carbón activado puede ser regenerado hasta un máximo de tres veces antes de perder 7.5% en masa, manteniendo sus propiedades fisicoquímicas.
3. El costo de la regeneración de carbón activado, por medio de un horno de múltiple hogar es Q 6.65.
4. La regeneración de carbón activado es un negocio rentable, ya que existe una diferencia de Q 7.85 en utilizar carbón regenerado en vez de utilizar carbón virgen.



## RECOMENDACIONES

1. Utilizar el horno de múltiple hogar hasta tres veces máximo el mismo carbón, sin agregar carbón activado virgen para compensar la pérdida de lo contrario la factibilidad económica se ve afectada.
2. Se sugiere la regeneración de carbón activado, como medio de reducción del consumo de carbón virgen, para reducir el consumo de material forestal, como un apoyo ambiental.
3. Comparar si con uno de los hornos mencionados, se puede reducir el costo de regeneración de carbón activado



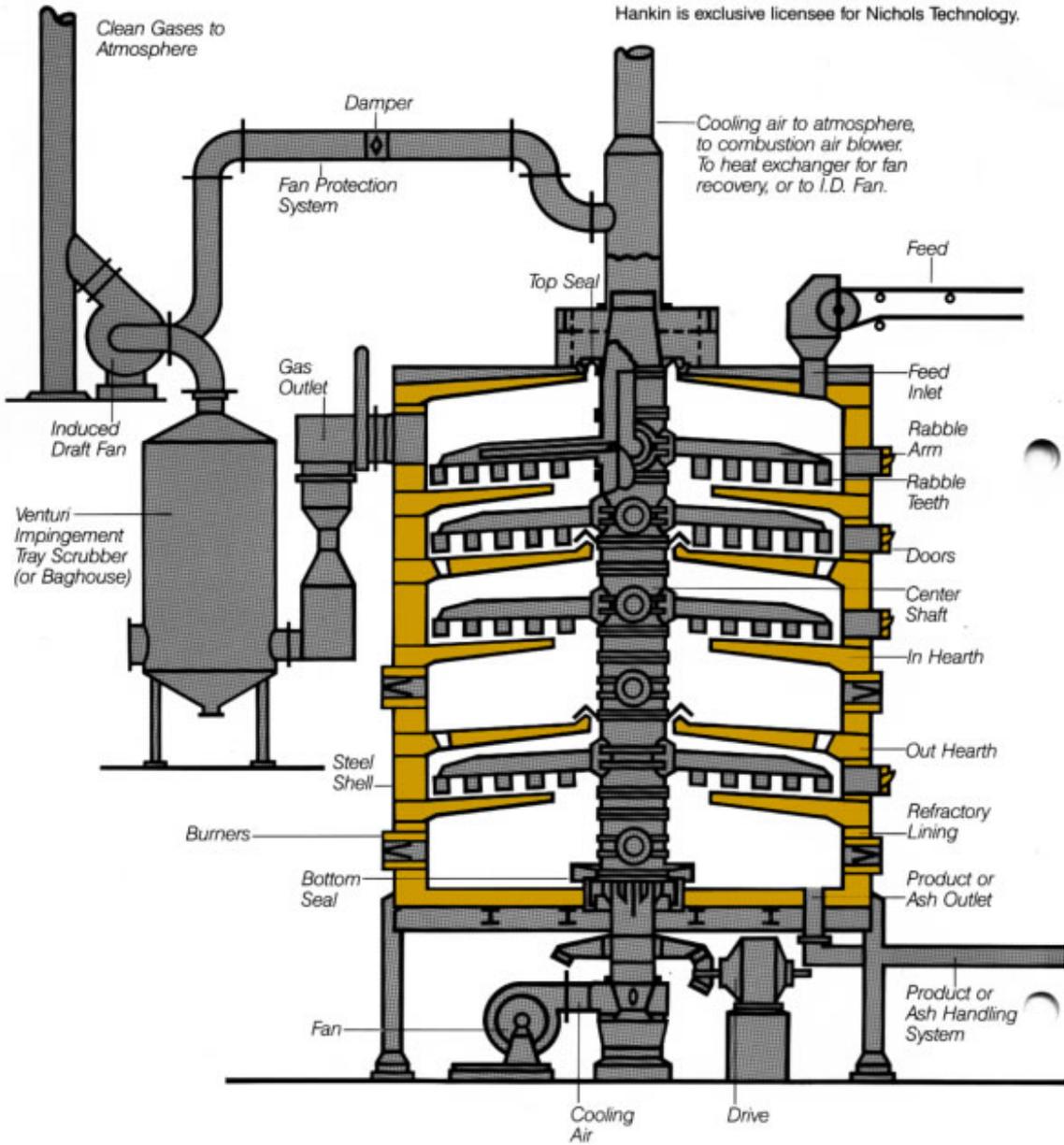
## BIBLIOGRAFÍA

1. CAFIL, Eduard. Test methods for activated. Brussels, Bélgica, European council of chemical manufactura federation. 1998.
2. NOBRAC. Boletin técnico carbon activado Nobrac. El tigre Zapopan, Jalisco, México. 1993.
3. NOBRAC. Especificaciones del carbón Nobrac. El tigre Zapopan, Jalisco, México, 1993.
4. NORIT, James. Activated carbon. Netherlan, .Norit corporation. Edición única. 1982.
5. YEHASKEL, Antonin. Activated carbon. New Cork. Noyes Park. 2da edición. 1978.



ANEXOS

Anexo A. Descripción del equipo



## Traducción

### Refracción

Los ladrillos refractarios forman el " hogar " en el que el producto se incinera. La multiplicidad de las propiedades de los ladrillos, en la construcción del horno proveen un abastecimiento satisfactorio, referente al calor.

Descripción de las partes del horno:

Miembros refractarios (el juego dentro del hogar). "Fireclay shapes (set in hearth)"

Miembros refractarias (el juego fuera el hogar). "Fireclay shapes (set out hearth)"

Miembros aislantes y apoyos. "Insulating forms and supports"

El azulejo o ladrillo del quemador. "Burner tile"

Las piezas del horno

En el corazón de del horno están las piezas de hierro y acero que tienen la exposición más alta a desgaste por rozadura y raspadura de las piezas. Puede existir defectos o fallas de funcionamiento por causa de las piezas gastadas, y es importante tener un inventario de piezas y su desgaste.

Descripción de piezas:

Alimentación (feed)

La asamblea del brazo agitador (Rabble arm assembly)

Pin del brazo agitador (Rabble arm pin)

Los dientes del agitador y espaciadores (Rabble teeth and spacers)

Puertas (door)

El eje central (Shaft section, Center shaft)

Dentro del hogar o etapa (in hearth)

Fuera del hogar o etapa (out Herat).

Recubrimiento refractario (refractory lining)

Toma del producto (product outlet).

Conductor del flujo (drive)

Aire de enfriamiento (cooling air)

Interruptor del ventilador del recinto (fan bottom seal)

Los quemadores (burners)

Carcaza de acero (steel shell)

Ventilador de tiro forzado (induced draft fan)

Limpiador de bandeja de ventura (venturi impingement tray scrubber)

Regulador de gases (damper)

Gases limpios liberados a la atmósfera (clean gases to atmosphere)

Fuente: CAFIL, Eduard. Test methods for activated. Brussels, Bélgica,  
European council of chemical manufactura federation. 1998.