

Obtención de carbón activado a partir de la cáscara de coco

Donaciano Luna¹, Armando González¹, Manuel Gordon^{1a} y Nancy Martín²
(1) UAM–Azcapotzalco, Area Termofluidos, Av. San Pablo 180, D.F., México.
(1a) mgs@correo.azc.uam.mx
(2) UAM-Iztapalapa, Depto. Química,
Av. San Rafael Atlixco 186, 09340, D.F., México, mgnc@xanum.uam.mx

Recibido: 11 diciembre 2006

Aceptado: 16 febrero 2007

Resumen

En México el 80 % del carbón activado que se utiliza en la industria es de importación. Por tal razón, en el presente trabajo, como parte de un proyecto terminal, se presenta una breve descripción sobre el carbón activado, además de una propuesta del diseño teórico de una unidad piloto. Esta unidad tiene como base un horno rotatorio para la obtención de carbón activado, material que tiene un alto valor agregado, a partir de la cáscara del coco, materia prima nacional, de menor valor y que México posee en abundancia. La unidad piloto consta de tres partes: a) el molino, b) el horno rotatorio y c) la cámara de enfriamiento. El diseño propuesto utiliza materiales fabricados en el país, con costos accesibles y una capacidad de producción de media tonelada de carbón cada seis horas.

Palabras clave: Carbón activado, horno rotatorio, cáscara de coco, diseño de proceso

Abstract The 80 % of activated carbons used in the industries in Mexico is of importation. The present work is part of a university terminal project. The basis of this project is the design of a plant to utilize shell coconut, since it is cheap and abundant in Mexico, as a raw material to produce activated carbon. The current shell coconut carbonization plant is designed to carbonize 1/2 tonnes of coconut per day to produce activated carbon. Materials with low costs and national products were used. The carbonization plant was integrated one the following: a) the mill; b) the rotary kiln, and c) the chamber of cool down.

Key words: Activated carbon, rotary kilns, coconut, process modeling,

Introducción

El nombre de *carbón activado* se aplica a una serie de carbones porosos preparados artificialmente, a través de un proceso de carbonización, para que exhiban un elevado grado de porosidad y una alta superficie interna.

El carbón activado es un adsorbente muy versátil ya que el tamaño y la distribución de sus poros en la estructura carbonosa pueden ser controlados para satisfacer las necesidades de tecnología actual y futura. Los carbones activados comerciales son preparados a partir de materiales precursores con un alto contenido en carbono, especialmente, materiales orgánicos como, madera, huesos, cáscaras de semillas de frutos, como también, carbón mineral, breas, turba y coque. La elección del precursor es fundamentalmente una función de su disponibilidad, precio y pureza, pero el proceso de fabricación y la posible aplicación del producto final deben ser igualmente tomados en cuenta. Los carbones activados tienen un alto costo que va desde US \$ 1200 hasta US \$14,000 la tonelada.

En México, el 85 % del carbón activado que se usa en la industria química es de importación, siendo los principales países abastecedores: Estados Unidos, los Países Bajos, Inglaterra, Alemania, Canadá y Francia.

El interés por este tipo de material se basa en algunas de sus propiedades: a) estabilidad térmica; b) resistencia al ataque ácido; c) carácter esencialmente hidrófobo (repelente al agua); d) bajo costo relativo; e) estructura porosa. Por tal razón, en los últimos años ha aumentado considerablemente el número de investigaciones en lo que concierne a su síntesis, y a sus diversas aplicaciones, como en la separación de gases y en la industria en general.

En el presente trabajo se propone el diseño de una

unidad piloto con un horno rotatorio para obtener carbón activado a partir de la cáscara del coco. Este trabajo formó parte de un proyecto terminal realizado en colaboración entre los departamentos de Energía de la UAM–A y el Departamento de Química de la UAM–I. En esta parte del proyecto se presenta la parte teórica donde se incluyen los cálculos para la realización y posterior construcción de una unidad piloto. La unidad está compuesta de tres secciones:

1. un molino,
2. un horno rotatorio, y
3. una cámara de enfriamiento.

En México no se conoce una tecnología nacional para diseñar una planta para obtener carbón activado, en particular basada en hornos rotatorios. Estos hornos en general, son usados en la industria del cemento y para la incineración de desechos; no se reporta su uso para la obtención de carbón activado. Por tal razón, se planteó como propósito obtener un prototipo a partir del presente modelo, que sea económico, de materiales accesibles y con buena capacidad de producción para procesar cáscara de coco y obtener carbón activado. Actualmente se está trabajando en la parte del diseño real de la unidad, ya que el proyecto fue seleccionado dentro de la convocatoria 2006, para integrarse al *Programa Emprendedores* de la UAM–A.

Breve historia del carbón activado

Los primeros usos de materiales a base de carbón fueron en aplicaciones médicas. Para ello usaban carbón vegetal como adsorbente preparado a partir de madera carbonizada, así lo describen los griegos en un papiro encontrado en Tebas que data de 1550 a.C. Posteriormente, los griegos amplían su uso para filtrar el agua, con el fin de eliminar malos olores y sabores y prevenir enfermedades.

De igual forma, se sabe que los barcos fenicios almacenaban el agua para beber en barriles de madera parcialmente quemados en su interior. Sin embargo, la primera aplicación documentada del uso de carbón activo en fase gas, se da en 1793 por el Dr. D. M. Kehl quien usa carbón vegetal para eliminar olores emanados por la gangrena. El mismo doctor lo usaba también para filtrar el agua para beber [Oviedo, 2006].

La primera aplicación industrial del carbón activado tuvo lugar en Inglaterra, en 1794, donde se usó como decolorante en la industria del azúcar, aún cuando la

patente se publica hasta 1812. En 1854 tiene lugar su primera aplicación a gran escala cuando un alcalde de Inglaterra ordena instalar filtros de carbón vegetal en los sistemas de ventilación de los drenajes. En 1872, aparecen las primeras máscaras con filtros de carbón activado usadas en la industria química para evitar la inhalación de vapores de mercurio.

No es sino hasta 1881, cuando Kayser introduce el término adsorción para describir como los materiales carbonizados atrapaban a los gases. En fechas cercanas, Von Raphael Ostrejko, quien se considera como el inventor del carbón activado, desarrolló varios métodos para producir carbón activado tal y como se conoce hoy en día. En 1901 patentó dos de su métodos.

Durante la Primera Guerra Mundial el uso de agentes químicos trajo como consecuencia la necesidad de desarrollar filtros de carbón activado para máscaras de gas. Este fue el punto de partida para el desarrollo de la industria de carbón activado que se expandió hacia otros usos.

En los años 60 varias plantas de aguas empezaron a usar carbón activado en forma de polvo o granular.

Actualmente, el carbón activado tiene cientos de aplicaciones diferentes, tanto en sistemas de vapor, como en fase líquida. El mayor consumo a nivel mundial es para aplicaciones en fase líquida siendo éste de hasta un 80 % .

Entre sus variados usos podemos mencionar: para purificar agua, desodorizar, adsorber gases, decolorar, o ionizar. Dadas sus características muy versátiles, los hacen valiosos en las industrias de minería, vitivinicultura, de alimentos, cigarreras, farmacéuticas, fabricación de filtros para control de emisiones, cosmética y muchísimas otras áreas.

En los últimos años, la creciente demanda de nuevos sistemas de almacenamiento de energía ha impulsado la utilización de los carbones activados en electrodos de condensadores eléctricos de doble capa, también llamados súper-condensadores. Estos dispositivos son usados en sistemas de copias de seguridad para computadoras, telefonía móvil, sistemas de potencia no-interrumpida, escáner, etc.

Carbón activo a partir de la cáscara de coco

A partir de la cáscara de coco es posible obtener diferentes tipos de carbones activados para aplicaciones diversas variando las condiciones de preparación.

Por ejemplo, activando la cáscara de coco a alta temperatura (800 °C) en presencia de vapor de agua se puede obtener un carbón hidrofílico (afinidad con el agua), microporoso (con ultramicroporos de diámetros < 0.7 nm), apropiado para aplicaciones que involucran separación de gases; pero, si se activa a menor temperatura (450 °C) usando un agente químico, como ácido fosfórico o cloruro de zinc, se puede obtener un carbón hidrofílico de poros mas anchos (con mesoporos > 2 nm) apropiado para aplicaciones en fase líquida [Reinoso, (2005)]. Además, de obtener una amplia distribución de poros, el carbón activado obtenido de la cáscara de coco resulta con mayor dureza y resistencia, comparado con el obtenido de madera. Otra ventaja que ofrecen los carbones activados obtenidos de materiales orgánicos, en relación a los obtenidos de materiales inorgánicos, es que en los primeros, el porcentaje de cenizas es menor.

El coco como materia prima a nivel mundial es muy abundante. Se produce en mas de 90 países en el mundo, no obstante sólo en una docena de ellos se concentra el 91.1% de superficie plantada con este cultivo. Los países asiáticos son los que cuentan con la mayor extensión. Los dos únicos países en América que forman parte de este grupo son Brasil con 2.4% y México con 1.4% ocupando el doceavo lugar. En México, el estado de Guerrero es el que presenta la mayor superficie (51.8%) plantada por cocoteros [Sagarpa, 2001]. En el 2002 México reportó una producción anual de coco de 959,000 toneladas [Cofupro, 2002].

El cocotero, es la más importante de todas las palmeras. Es conocido como el árbol de la vida, ó el árbol de los mil usos, su fruto, hojas y madera, proporcionan a muchos pobladores rurales de alimento, bebidas, combustible y alojamiento. Aunque su uso predominante es el de la producción de copra (la carne seca del coco), de la que se obtiene aceite, muy bien cotizado en las industrias de alimentos y cosméticos, y los residuos que quedan, se usan para pasto animal. La cáscara dura o endocarpio del coco se usa como combustible de alto valor calorífico (7500–7600 cal/g), y también sirve de materia prima para la obtención de carbón activado.

Debido al gran auge del mercado del carbón activado resulta conveniente estudiar las posibilidades de expansión en la utilidad y la producción del cocotero. Así, si se considera que una hectárea en una hacienda de cocos puede producir unos 10 mil cocos

por año, y que cada coco tiene una cáscara de aproximadamente 200 gramos se tendría entonces, 2 toneladas de cáscara de coco por hectárea. Para obtener una tonelada de carbón activado se necesitan aproximadamente 11 toneladas de cáscara de coco [Soyentrepreneur, 1998]. Los requerimientos de producción que se estiman para la unidad que se propone son de aproximadamente 600 toneladas anuales de carbón activado.

Estructura y propiedades del carbón activado

Desde el punto de vista estructural, el carbón activado se puede definir como un material carbonoso poroso preparado a partir de un precursor a base de carbón con gases, y en ocasiones con la adición de productos químicos (por ejemplo, ácido fosfórico, cloruro de cinc, hidróxido de potasio, etc.), durante y después de la carbonización, para aumentar la porosidad.

La estructura del carbón activado está constituida por un conjunto irregular de capas de carbono, con espacios que constituyen la porosidad (Figura 1, pág. 42). Este ordenamiento al azar de las capas y el entrecruzamiento entre ellas impide el ordenamiento de la estructura para dar grafito (Figura 2, pág. 42), aún cuando se someta a tratamientos térmicos de hasta 3000°C. Es precisamente, esta característica del carbón activado la que contribuye a su propiedad más importante, la estructura porosa interna altamente desarrollada y al mismo tiempo, accesible para los procesos de adsorción [Reinoso, (2005)].

La superficie específica y las dimensiones de los poros dependen del precursor y de las condiciones de los procesos de carbonización y activación utilizados. Los tamaños de poros van desde los mas pequeños, llamados microporos ($\approx 2,0$ nm) hasta los mesoporos (entre 2.0 y 50.0 nm) y macroporos (> 50,0 nm). La aplicación puede requerir de carbón activado bajo diferentes presentaciones: polvo (CAP, con tamaño medio de partícula en el carbón en polvo de 15–25 μ m) y granular o conformado (CAG, con tamaño medio de partícula de 1.0–5.0 mm). Otras formas son: las fibras, telas, membranas, y monolitos, de carbón. La selección en el tipo de presentación se basa según el grado de purificación que se requiera [Reinoso, (2005)].

Sin embargo, las propiedades adsorbentes de un carbón activado no sólo están definidas por su estructura porosa, sino también por su naturaleza química.

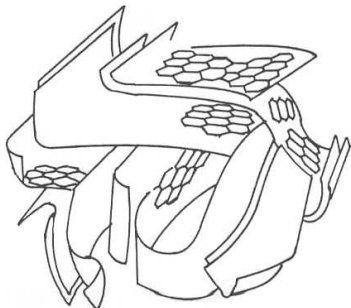


Figura 1. Estructura del carbón activado (Adaptado de Wikipedia, 2006)

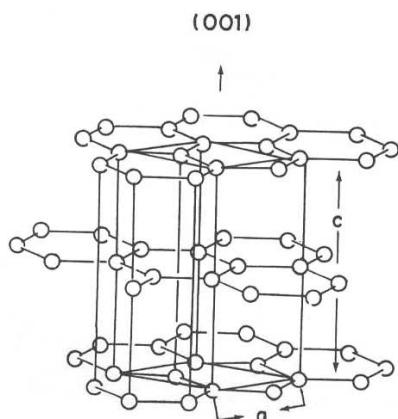


Figura 2. Estructura del carbón tipo grafito (Adaptado de Wikipedia, 2006)

El carbón activado presenta en su estructura átomos de carbono con valencia insaturada y además, grupos funcionales (principalmente de oxígeno y nitrógeno) y componentes inorgánicos provenientes de las cenizas, todos ellos con un efecto importante en los procesos de adsorción. Los grupos funcionales se forman durante el proceso de activación por interacción entre los radicales libres de la superficie del carbón que hacen que la superficie del carbón se haga químicamente reactiva y es la razón por la que afectan las propiedades adsorbentes, especialmente para moléculas de cierto carácter polar.

Así, el carbón activado puede ser considerado en principio como hidrófobo, por su poca afinidad al agua, lo que es muy importante en aplicaciones de adsorción de gases en presencia de humedad, o de especies en disolución acuosa; pero la presencia de grupos funcionales en su superficie hacen que pue-

dan reaccionar con el agua, haciendo que la superficie sea más hidrófila. La oxidación de un carbón, produce la formación de grupos hidroxilo (OH^-), carbonilo (RCHO), carboxilo (RCOOH), etc., que le dan al carbón un carácter anfótero, esto es, carácter ácido y básico, a la vez. Esto influye en la adsorción de muchas moléculas.

Métodos de activación del carbón

Los procesos de fabricación se dividen en dos, según el tipo de activación: la activación física (llamada también térmica) y la activación química.

Activación física. La porosidad de los carbones preparados mediante activación física es el resultado de la gasificación del material carbonizado a temperaturas elevadas. En la carbonización se eliminan elementos como el hidrógeno y el oxígeno del precursor para dar lugar a un esqueleto carbonoso con una estructura porosa rudimentaria. Durante la gasificación el carbonizado se expone a una atmósfera oxidante (vapor de agua, dióxido de carbono, o mezcla ambos) que elimina los productos volátiles y átomos de carbono, aumentando el volumen de poros y el área específica. El carbón que se obtiene es llamado carbón primario (similar al usado para asar carnes).

Activación química. La porosidad de los carbones que se obtiene por activación química es generada por reacciones de deshidratación química, que tienen lugar a temperaturas mucho más bajas. En este proceso el material a base de carbón se impregna con un agente químico, principalmente ácido fosfórico (o cloruro de cinc) y el material impregnado se calienta en un horno a 500–700 °C. Los agentes químicos utilizados reducen la formación de materia volátil y alquitranes [Robau, (2006)]. El carbón resultante se lava para eliminar los restos del agente químico usado. Este carbón es llamado carbón secundario.

Pruebas de caracterización del carbón

Entre las técnicas de caracterización usadas para el material de origen (cáscara de carbón) están las de análisis térmico diferencial y termo-gravimétrico (DTA–TGA, por sus siglas en inglés). En un termograma de DTA, el calor absorbido o emitido puede ser evaluado mediante las diferencias de temperaturas existentes entre el sistema a evaluar y un sistema de referencia. A una velocidad de calentamiento constante, al sistema que se encuentra en atmósfera de nitrógeno, se le aumenta su temperatura desde temperatura ambiente hasta aproxima-

damente 1200°C. Al mismo tiempo, es posible obtener los termogramas de TGA, donde se determina las diferentes pérdidas de peso del material a carbonizar en función de la temperatura y analizar las zonas térmicas donde hay mayores pérdidas de peso. Así, es posible obtener la temperatura óptima de activación y el rendimiento a esa temperatura.

También es importante conocer la composición química de la cáscara de coco o el material a carbonizar para evaluar las opciones del proceso. Es necesario conocer la composición a través de un análisis elemental: carbono, hidrógeno, nitrógeno y azufre (C, H, N, S), para poder evaluar la calidad del carbón a obtener.

Para la caracterización de la estructura porosa del carbón activado, la técnica de adsorción de gases y vapores es una de las técnicas más convenientes. La determinación de una isoterma de adsorción permite deducir la superficie específica, a través de la conocida ecuación BET (Brunauer, Emmett y Teller) [Gregg y col., 1969]. En general, la superficie específica varía entre 500 y 2000 m²/g. Además, es posible determinar la porosidad del carbón accesible a la molécula que se adsorba. La estructura microporosa del carbón puede obtenerse a partir de la adsorción de nitrógeno a 77 K y dióxido de carbono a 273 K. El dióxido de carbono permite determinar el volumen de microporos más estrechos, mientras que la de nitrógeno suministra el volumen total de microporos. Para conocer la meso- y macroporosidad es posible aplicar la ecuación de Kelvin [Gregg y col., 1969] para deducir la distribución de tamaños de poros. También, es posible la aplicación de la técnica de porosimetría de mercurio que permite medir poros hasta 7.5 nm.

Adicionalmente, las normas de la sociedad americana (ASTM, por sus siglas en inglés American Society for Testing and Materials Standards) establecen pruebas estándar necesarias para establecer la calidad del carbón obtenido, entre ellas están: el porcentaje de humedad, el porcentaje de cenizas, el tamaño de malla, la resistencia a la abrasión, y el índice de yodo.

Propuesta del proceso de obtención del carbón activado

Etapas del proceso

El proceso consta de las siguientes etapas:

1. Secado de la cáscara de coco;

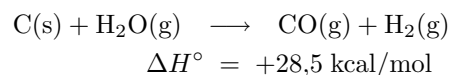
2. Molienda del producto seco;
3. Tratamiento térmico del material (carbonización y activación);
4. Enfriamiento y secado de los materiales tratados.

El proceso de *secado* se hará al sol de forma manual.

El proceso de *molienda* se realizará en un molino con la capacidad necesaria para poder moler la cáscara de coco seca de manera eficiente con la granulometría establecida para que pueda mantener la velocidad de alimentación requerida por el horno rotatorio a diseñar; además que pueda trabajar por pausas y que no esté en operación constante.

El proceso de *carbonización-activación*, se llevará a cabo en el horno rotatorio a diseñar, el cual operará de manera continua y solo podrá ser suspendido al realizar labores de mantenimiento general. El proceso de activación tiene como objetivo crear en la superficie del carbón muchos poros u orificios microscópicos que van a atraer a las moléculas de diferentes sustancias. En el presente proceso se usará un tipo de activación física con vapor de agua.

Se seleccionó la *activación física del carbón* con vapor de agua por ser un proceso más económico y menos corrosivo y se realiza a temperaturas inferiores a las aplicadas en la activación química tradicional, lo que simplifica el proceso. Todo ello se traduce en un menor costo, así como en un menor impacto en el medio ambiental. La activación física con vapor de agua es un proceso complicado que se lleva a cabo en el presente caso en un horno rotatorio a temperaturas elevadas (800–1000 °C). La activación física ocurre según la siguiente reacción endotérmica:



El proceso de enfriamiento, que se llevará a cabo al final del horno, tiene como fin reducir la temperatura del tratamiento térmico a la salida del horno, con la intención de facilitar las operaciones de manejo y embalaje del material. El esquema de la unidad piloto se presenta en la Figura 3, pág. 44.

Descripción general del horno rotatorio

Los hornos rotatorios son usados desde hace 50 años en las industrias, de alimentos, de construcción, metalúrgica, etc. Sin embargo, su uso más común es para la incineración de residuos peligrados, debido a

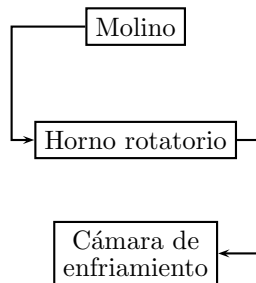


Figura 3. Esquema de la unidad piloto.

sus altas temperaturas de trabajo (1200–1700 °C) y tiempos de residencias (50–70 min).

Se pueden incinerar diferentes tipos de residuos como sustancias líquidas (solventes orgánicos) que son inyectadas directamente, sustancias poco fluidas (lodos y pastas fluidas) que son inyectadas con una bomba de pistón, y pastas fluidas, que se encapsulan en recipientes cerrados para su alimentación. En la industria de la construcción, estos hornos son usados en el proceso de calcinación de la piedra caliza. Otra aplicación es en la industria de la fundición, en particular para la fusión de hierro.

Aún 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 2–6%) 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]. La alimentación es un sólido seco carbonoso molido.

El diseño conceptual del horno rotatorio del presente proyecto consta de un cuerpo cilíndrico, el cual utiliza ladrillo refractario en la parte interior de un cilindro de acero que será la estructura, con una capa exterior de aislante térmico y una lámina que sostenga dicho aislante. Para la rotación de este cuerpo cilíndrico se le colocaran anillos de acero que

tendrán la función de estar en contacto con los apoyos que permitan la libre rotación, además de un engrane, que será donde se genere la rotación para el horno rotatorio.

El sistema de alimentación será una tapa que tendrá una resbaladilla por la cual se alimentará la materia prima molido al horno rotatorio. Allí también estará instalado el quemador que será el que genere el calor necesario. Para el sello de la tapa con el cuerpo cilíndrico se utilizará una cejilla tipo C de forma tal que la pérdida de los gases sea mínima y a la vez no interfiera con la rotación del horno.

El sistema receptor es el que recibe el material (carbón activado). Así mismo, en este sistema se genera la activación por medio de vapor de agua. Para generar el vapor de agua se utilizará un difusor, el cual mandará al interior del horno partículas de agua por medio de presión neumática que al entrar en contacto con el calor interno del horno cambia de fase líquida a vapor. Con esto, se logrará llevar a cabo la activación, controlar los gases internos del horno y disminuir la temperatura a la salida del material. El sistema receptor podrá ser desplazado de manera horizontal, cuando sea necesario, para dar mantenimiento al horno.

La inclinación del horno rotatorio será de 5% esto acorde a la información recabada sobre el horno rotatorio que se utiliza en la industria de cemento [Ortiz y col. 2005]. Para evitar que las bases también tengan una inclinación, las superficies de los apoyos serán las que tengan esta inclinación.

Los gases calientes serán los obtenidos del quemado del combustible (gas natural) que se encuentra en una cámara de combustión central, y serán los que proporcionen la energía necesaria para la reacción de activación. El vapor de agua (con aire) será inyectado como agente de activación en modo de contracorriente. Se supone que el lecho sólido se moverá como un pseudo-fluido con un desplazamiento axial y sin retro-mezclado, y éste se irá desplazando en dirección transversal como el cilindro vaya rotando. En la primera sección longitudinal del horno, se realizará el pre-calentamiento de la carga hasta la temperatura de operación, donde se liberará la mayor parte de los compuestos volátiles producidos. En el resto de la longitud del horno, se llevará a cabo lo que resta de la reducción del material carbonoso, obteniéndose la activación necesaria.

Cuadro 1. Condiciones de operación del horno rotatorio a diseñar.

Largo/m	15.0
Diámetro/m	3.5
Inclinación	5 %
Temperatura máxima de operación/ $^{\circ}\text{C}$	1000.0
Velocidad de rotación/rpm	10.0
Potencia de Motor trifásico/HP	40.0
Consumo de gas natural/(kg h)	13,306.8
Capacidad de producción/(ton día)	16.5

Las variables generales requeridas para el diseño del horno rotatorio se establecieron según:

- Una capacidad de producción suficiente para que sea rentable;
- Funcionamiento con operación continua;
- Costo de construcción accesibles.

La Tabla 1 muestra las condiciones de operación del horno rotatorio a construir.

Resultados

1) Diseño teórico del horno rotatorio.

1.1 Material para la construcción del horno rotatorio.

Ladrillo refractario: El ladrillo refractario a usar es de la marca McGills Ware House (EUA) con las características dadas en la Tabla 2. El tipo de liga entre ladrillos es un cemento aislante monolítico según la Norma ASTM-C-195.

El número de ladrillos a utilizar para el revestimiento interno del horno rotatorio es de 100 piezas por circunferencia. A lo largo, el horno contará con 55 circunferencias. Esto hace un total de 5500 ladrillos, con un peso total de 4724.5 kg. El costo por cada ladrillo es de 1,88 dólares (EUA). Por tanto, el costo total será de 5,610.0 dólares por las 5500 piezas.

Cilindro de acero:

Se usarán 4 cilindros de acero rolado de la casa Rolado Industrial S.A., de Guadalajara, México. Las características de los cilindros a usar están dadas en la Tabla 3.

Aislante térmico según norma ASTM-C-592:

Se usará lana mineral en rollo de la marca RATSA S.A. Se usará un total de 82 rollos. Las características se dan en la Tabla 4, pág. 46.

Cuadro 2. Características del ladrillo refractario

Dimensiones/m	$0.2286 \times 0.1143 \times 0.0635$
Volumen/ m^3	0.0165919
Densidad/ kg m^{-3}	500
Masa de Ladrillo/kg	0.82959
Resistencia a la compresión/MPa	1
Temperatura máxima/ $^{\circ}\text{C}$	1260
Coefficiente de conductividad térmica (k_1)/W/mK	0.2
Composición química/% en masa	
SiO ₂	45
Fe ₂ O ₃	1
CaO	15

Cuadro 3. Características de los cilindros de acero

Longitud/m	3.00
Diámetro/m	2.54
Espesor/m	0.0127
Volumen de cada cilindro:	
$P_c = (\pi (2.54))/\text{m}$	7.98
$V_c = (8 \times 3 \times 0.0127)/\text{m}$	0.305
$A_c = (8 \times 3)/\text{m}^2$	24
$W_{\text{placa}}/\text{kg m}^{-2}$	99
$W_{\text{cilindro}} = (24 \times 99)/\text{kg}$	2400
Coef. Conductividad térmica (k_2)/W/mK	58

2) Diseño teórico del molino.

El molino tiene como función principal reducir el volumen de la materia prima para que la alimentación al horno rotatorio sea la óptima, además poder definir el tamaño de grano que se quiera para el carbón activado. Por tanto, el molino debe tener una gran capacidad de alimentación y un paso de material casi instantáneo. Como la materia a moler se considera rígida y a su vez blanda, para el sistema de molienda la reducción del área será una disminución exponencial de la sección, hasta llegar al de un tamaño requerido; además, debe tener una malla para que el molido a la salida sea uniforme. Se usará una máquina trituradora de alto torque.

La rotación la llevará a cabo el cilindro de acero con cuchillas, las cuales serán las encargadas de moler el material con una rotación entre los 2500 y las 3600 rpm.

Cuadro 4. Características del aislante térmico usado.

Densidad/kg m ⁻³	112.14
Temperatura máxima/°C	650.0
Dimensiones:	
Espesor/m	0.0762 a 0.1016
Largo/m	2
Ancho/m	0.61
Volumen/m ³	7.315
Masa (W _{lana})/kg	820.32
Coef. Conductividad térmica (k ₃)/w/mK	0.041

El motor (MotorSiemens Tipo RG250 Cat. N°. HSI 3325) suministrará la potencia requerida al molino (15 HP a 1800 rpm) por medio un sistema de bandas y poleas.

Las características principales se describen en la Tabla 5.

3) Diseño Teórico de la cámara de enfriamiento.

La cámara de enfriamiento tiene como funciones principales retirar el material terminado del horno rotatorio y a su vez, reducir la temperatura de salida para que el manejo y almacenado del material sea más seguro.

La cámara de enfriamiento para desplazar el material del horno rotatorio utilizará un engrane helicoidal comúnmente llamado tornillo de Arquímedes. Para el enfriamiento se utilizará agua que estará circulando entre la paredes del canal por donde se desplazará en contra corriente al desplazamiento del material.

La tolva de entrada de la cámara de enfriamiento tendrá las dimensiones necesarias para poder recibir el material a la salida de la tapa receptora del horno rotatorio. Debido a la longitud del engrane helicoidal, éste estará dividido en dos partes y será unido por un soporte ubicado a la mitad del canal para evitar deflexiones en el eje del sistema. Para que el movimiento rotacional del engrane helicoidal sea óptimo se utilizarán rodamientos de soporte para las cargas axiales; ya que además de soportar el peso del eje, tiene que soportar la cargas axiales generadas al desplazar el material en la cámara de enfriamiento. Se utilizará un motor reductor para ajustar las revoluciones a las que se necesite girar el engrane helicoidal. Para transmitir esta potencia se utilizará un sistema de cadenas. Las ca-

Cuadro 5. Características principales del molino.

Factor de servicio	1.5
Potencia de diseño/HP	22.5
Velocidad (n_1)/rpm	1750.00
	1312.15 (n_2)
Velocidad (n_2)/rpm	nueva = 1135.87)
Tipo de Banda	5V
Relación de velocidad	1.33
Diámetro/pulg.	min = 5.45 max = 15.27
Diámetro estándar/pulg.	$d_1 = 8.90$ $d_2 = 11.70$
Potencia de diseño específica / HP	25.0
N° de bandas a utilizar	1
	11,7 < C < 61,8 (C=25.0) (C (nueva) = 23.7)
Distancia entre centros/pulg	82.42 (estándar = 80.00)
Longitud de la banda / pulg	
Angulo de contacto	137.22°
Velocidad lineal/pie min ⁻¹	4091.84

racterísticas principales se dan en la Tabla 6 (pág. 47).

El Rodamiento SKF seleccionado por su dimensión del diámetro interior de 152.4 mm, fue modelo 231649/610/VQ51; sistema moto reductor ATCOR GERYTMA, modelo MRC 220 B2.

En la Figura 4 (pág. 47), se muestra el esquema final de la Unidad Piloto y en la Tabla 7, página 47, se resumen los costos de fabricación de la misma.

Conclusiones

Esta etapa es sólo la apertura para poder llevar a la realidad el proyecto aquí presentado. El segundo paso es la construcción de un modelo a escala que nos permita ver los detalles de la fabricación y la funcionalidad del proyecto y poder hacer las estimaciones y modificaciones necesarias para que al momento de aterrizar el proyecto final (a nivel industrial), éste sea exitoso.

Se trató en todo momento que el diseño de los dispositivos fueran sencillos y con ello minimizar los costos de la elaboración del proyecto, además que todos los materiales fueran conseguidos en México;

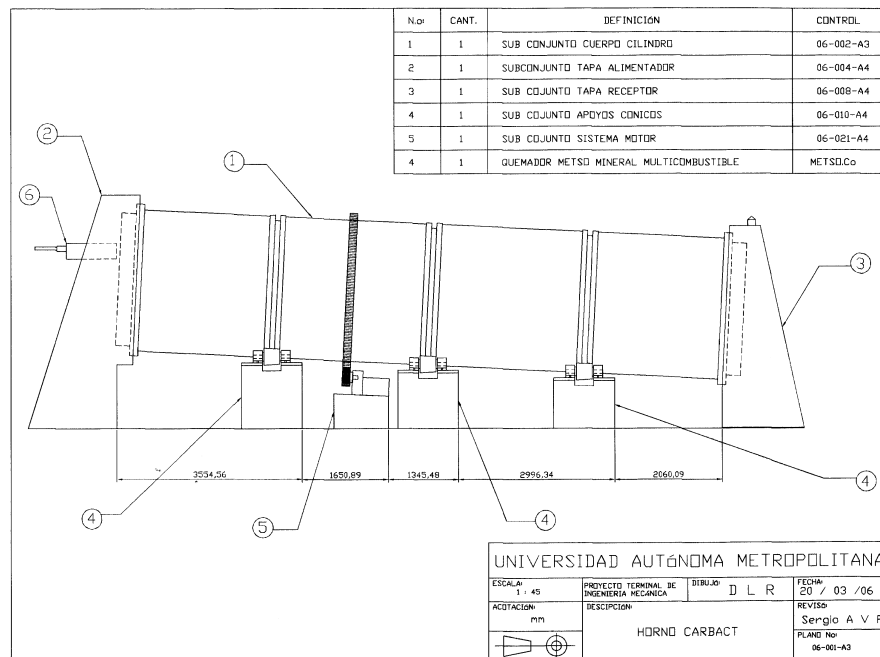


Figura 4. Esquema final del diseño del horno rotatorio.

Cuadro 6. Características principales de la cámara de enfriamiento

Flujo de salida/ Ton min ⁻¹	0.011
Densidad relativa del Carbón / g m ⁻³	0.50
Q / L s ⁻¹	0.336
Diámetro de la rosca/mm	668
Paso de la rosca/mm	467.6
Revoluciones del engrane/rpm	≈ 60.0
Paso del engrane/m ³	0.018
Potencia mínima para rotar engrane / HP	1.65

ésta fue la parte mas compleja del proyecto, debido a que no es muy fácil que las empresas hagan cotizaciones que no rindan un ingreso económico.

Aun así se pudo hacer una estimación de los costos de elaboración y los resultados obtenidos nos indican que el costo es bajo, aún cuando es necesario tomar en consideración que se adicionarán costos a los establecidos, para poder llevar a cabo la funcionalidad del proyecto a nivel industrial, donde se elabore el carbón activado.

La capacidad de producción de carbón activado estimada es acorde con las necesidades nacionales requeridas.

Otras de las ventajas que podemos mencionar de la unidad es que la tecnología es nacional, novedosa, segura, y barata. Por otro lado, utiliza vapor de agua como agente de activación, el cual es más económico y menos corrosivo que los agentes químicos utilizados habitualmente, lo que facilita y simplifica el proceso. Se propone usar como combustible gas natural, en lugar de gasóleo, con el fin de reducir emisiones tóxicas. Todo ello se traduce en menor costo y menor impacto medioambiental.

El proyecto es muy ambicioso dado que se está proponiendo un nuevo tipo de agroindustria que utilice a una materia prima nacional (cáscara de coco) considerada basura, transformándola en una industria sustentable de un material con mayor valor agregado (carbón activado), que genere, ingresos económicos a las personas que viven del coco, nuevos empleos y que ayude a reducir la importación de este producto.

Bibliografía

1. Gregg S. J., Sing K. S. W., (1969) "Adsorption,

Cuadro 7. Costos de elaboración del proyecto

PARTES	COSTOS (M.N.)
HORNO	
ROTATORIO	
Cuerpo cilíndrico	280,000.00
Tapa alimentador	30,000.00
Tapa receptor	39,000.00
Apoyos cónicos	171,000.00
Sistema motor	142,000.00
Quemador metso mineral combustible	230,000.00
SUB-TOTAL 1	892,000.00
MOLINO	
Cuerpo	4,000.00
Tapa	1,500.00
Cilindro	15,000.00
Sistema Motor	20,000.00
Rodamientos	5,000.00
SUB-TOTAL 2	45,500.00
CÁMARA ENFRIAMIENTO	
Coraza	25,000.00
Receptor	1,000.00
Salida	500.00
Inyectores	8,000.00
Tornillo helicoidal	28,000.00
Sistema motor	6,500.00
SUB-TOTAL 3	69,000.00
TOTAL UNIDAD PILOTO	1,006,500.00
Mano de obra	704,550.00
COSTO FINAL UNIDAD PILOTO	1,711,050.00

3. <http://www.cofupro.org.mx/04.documento/bases/pennitt/penit118.pdf> (Consultada el 12 de enero del 2006).

4. <http://www.sagarpa.gob.mx/subagri/desarrollo-agricola/FAO/2001/nac/PPCO.pdf> (Consultada el 13 de enero del 2006).

5. <http://www.soyentrepreneur.com> (Consultada el 12 de junio de 2006).

6. <http://es.wikipedia.org> (Consultada el 12 de Julio de 2006)

7. <http://www.oviedo.es/personales/carbon/cactivo/impqcatex.htm> (consultada el 06 de febrero de 2007).

8. Kirk–Othmer’s Encyclopedia of Chemical Technology (1992), 4a Edición, vol.4 John Wiley, New York.

9. Ortiz, Oscar O., Suarez, Graciela I., y Nelson, Aros, (2005) “Dynamic simulation of a pilot rotary kiln for charcoal activation”, Computers and Chemical Engineering, 29 1837.

10. Reinoso, Francisco, (2005) “Carbon activado: estructura, preparación y aplicaciones”, Revista Uniandes, Colombia, 66–69.

11. Robau Sánchez, A. J., (2006) “Síntesis de Tami-ces Moleculares de carbón a partir de materiales lignocelulósicos”, Tesis de Doctorado, CBI, UAM-A, México.

Surface Area and Porosity”, Academic Press, London and New York.

2. Mellmann, Jochen, Specht, Eckelard, y Liu, Xiaoyan, (2004) “Prediction of rolling bed motion in rotating cylinders”, AIChE Journal, 50 119, 2783.

CS