



**Universidad de Matanzas
“Camilo Cienfuegos”**

MONOGRAFIA

**Regeneración del carbón activado en polvo como
vía de mitigar la contaminación ambiental
provocada por su uso en la industria azucarera**

Autores:

MSc. Ena Hernández

Dra. Juana Zoila Junco

Dr. Carlos Martín¹

Dpto. de Química e Ingeniería Química

Facultad de Ingenierías Química y Mecánica

Matanzas

2005

Resumen

Este trabajo tiene como antecedentes los daños causados por el vertimiento al mar de residuales del proceso de refinación de azúcar crudo, que contienen carbón activado en polvo agotado en suspensión. Como vía de solución a este problema sería conveniente la recuperación y reutilización del carbón agotado. Para ello, se realiza un análisis bibliográfico sobre el carbón activado, sus características y usos. Se describen las características del residual resultante de la refinación de azúcar con carbón activado en polvo. Se evalúan los métodos existentes para la regeneración de carbón activado agotado, se valoran las posibilidades de cada método para ser aplicado en las condiciones de la industria azucarera cubana y se precisan las variables más significativas a tener en cuenta en la regeneración de carbón activado en polvo agotado. La literatura consultada no reporta información sobre regeneración de carbón activado en polvo agotado a escala industrial, se propone la regeneración considerando la combinación de filtración a vacío, pH y temperatura.

Introducción

El hábitat natural de las especies vivas es afectado sistemáticamente por la acción antrópica. Como resultado de la actuación depredadora del hombre, la degradación de especies de plantas, animales y microorganismos se incrementa a un ritmo acelerado, lo que puede apreciarse en la desaparición de cientos de especies cada año. El deterioro vertiginoso y creciente del medio es, hoy día, posiblemente el peligro a largo plazo más grave que enfrenta toda la especie humana en su conjunto y muy particularmente los países subdesarrollados.

La contaminación de los océanos, mares y zonas costeras así como el peligro a que se ven expuestos los recursos vivos existentes en esas áreas, constituye un problema ambiental de gran envergadura. Como el agua tiene una capacidad elevada de autodepurarse, se ha utilizado este criterio para justificar el vertimiento de sustancias de desecho a ríos, embalses y al mar, ya que se ha considerado que la disolución es la solución a los

problemas de contaminación. Sin embargo, el poder autopurificador de los cursos de agua es limitado, por lo que el vertimiento indiscriminado de sustancias tóxicas conlleva al deterioro de todo el sistema acuático y a cambios catastróficos (Álvarez, 1995).

Durante la refinación de azúcar con carbón activado en polvo, en los poros del carbón se adsorben sustancias coloreadas. Como resultado ocurre la decoloración del azúcar y el agotamiento del carbón activado. Si el residual de carbón agotado se dispone al mar, puede provocar un impacto negativo sobre la flora y la fauna local, dañando el paisaje, y provocando desfavorables incidencias ecológicas.

Una atención adecuada a los efluentes que genera cada proceso productivo y el conocimiento de las posibles vías de contrarrestar sus efectos permite conjugar de forma armónica el desarrollo industrial con la protección de los recursos naturales. Una forma distinta de gestionar la tecnología para enfrentar el problema ambiental es el enfoque de *producción más limpia* (P+L), el cual prevé la contaminación en su punto de generación. El concepto de P+L se define como “la forma de producir que requiere (...) sean consideradas todas las fases de vida de un producto o de un proceso con el objetivo de prevenir o minimizar el riesgo (...) para los humanos y el medio ambiente” Su aplicación estimula la innovación de procesos que utilicen al máximo los recursos y no produzcan más impacto residual que el asimilable por el ecoambiente (Rigola, 1998).

El componente principal del residual que nos ocupa es el carbón activado en polvo (agotado), cuya posible recuperación resulta muy atractiva, ya que el carbón activado es un producto muy costoso y con amplia aplicación debido a su gran poder adsorbente. La recuperación del carbón activado y su posterior reciclado al proceso de refinación de azúcar podría atenuar la contaminación ambiental y contribuir a la reducción de los costos del proceso.

Este trabajo está encaminado a analizar la bibliografía existente sobre carbón activado, sus usos, las afectaciones al medio ambiente provocadas por el residual de carbón activado en polvo del proceso de refinación de azúcar, así como sobre los procedimientos de regeneración del carbón activado.

Carbón activado

El carbón activado es una sustancia carbonosa altamente porosa con amplia aplicación en tratamiento de gases y líquidos. En papiros egipcios se reporta su uso con fines

medicinales en el siglo XV a.C. Ya en nuestra era, en el siglo XVIII, Sheele reconoció el poder adsorbente del carbón en experimentos con gases. Durante la Primera Guerra Mundial, su uso se incrementó notablemente al ser empleado en la fabricación de caretas antigases como protección contra el cloro gaseoso. En la actualidad, el uso del carbón activado llega a los más diversos sectores de la industria (Parker y Hughes, 1998).

El carbón activado o activo es el material que se obtiene por un tratamiento especial del carbón vegetal, por medio del cual se aumenta en muchas veces su porosidad debido a la eliminación de los residuos de sustancias volátiles y a la incineración de las capas alquitranosas (Gordon y cols., 1988). También puede ser definido como un adsorbente poroso, cuyo esqueleto está formado por rejillas de anillos de seis átomos de carbono, unidos covalentemente con radicales carbonados, hidrógeno y ocasionalmente con oxígeno (Vyrodov, 1987). Otros autores (Enciclopedia Universal Sopena, 1977) plantean que el carbón activado es el carbón procedente de la leña, del que han sido eliminado los hidrocarburos y que tiene la propiedad de adsorber gases de elevado peso molecular. Toda la literatura consultada coincide en que el carbón activado es un material poroso preparado de la carbonización y activación de sustancias orgánicas y que tiene propiedades adsorbentes.

Aunque cierta literatura (Babor, 1970.) limita el origen del carbón a la leña, existen referencias de que el mismo puede producirse a partir de fuentes minerales como turba, hulla, lignito y antracita, así como de materiales de procedencia animal, como son los huesos (Díaz, 1985). También puede ser obtenido a partir de fuentes vegetales no tradicionales, tales como desechos agrícolas y de la industria de elaboración de alimentos. Entre esas fuentes se destacan las cortezas de almendros, nogales y cocos (Metcalf y Eddy, 1992), los residuos sólidos de la extracción de aceite (Warhurst, 1996) y el bagazo de la caña de azúcar (Lavarack, 1997). Otra materia prima con potencialidad para la elaboración de ese valioso producto la constituyen las vainas del árbol *Moringa oleifera* (Warhurst, 1996).

En los últimos años en Cuba se han realizado múltiples investigaciones dirigidas a la obtención de carbón activado a partir de materiales disponibles localmente, tales como casuarina y carapachos de coco (CIPIMM, 1992). Recientemente, investigadores de la

Universidad de Pinar del Río han realizado un estudio de la factibilidad de producir carbón activado a partir de aserrín y residuos forestales (Marqués, 1999).

1.1. El carbón activado como adsorbente

La capacidad de absorción de ciertos materiales entre ellos el carbón activado se reconoció por los experimentos de Sheele en 1773, Lowitz reportó las primeras experiencias en la decoloración de soluciones con carbón vegetal.

En este inicio se utilizaba carbón de hueso en polvo que se desechaba después de su empleo. Durante todo este siglo XIX se hicieron considerables esfuerzos investigativos para sustituir el carbón de hueso por un adsorbente de menor costo, pero no fue hasta 1900 con la patente de Ostrejko que se logran crear las bases para un desarrollo de la producción de carbón activado a partir de materia prima de origen vegetal especialmente madera y turba. Este carbón activado en polvo no fue utilizado hasta 1915 en que se notó mayor desarrollo en la producción del mismo.

La capacidad adsorbente del carbón activado depende de su porosidad y de su estructura química (Díaz,1985). En el concepto de porosidad se incluyen el área superficial, así como el volumen, la forma y la distribución del tamaño de los poros. Según (Gordon y cols., 1988) la superficie específica de estos poros alcanza dimensiones enormes que pueden llegar a centenares de metros cuadrados por gramo de carbón activado.

La estructura química se refiere a la cantidad y naturaleza de los grupos funcionales presentes en el carbón. Estos grupos funcionales provienen de la materia prima original o de la adsorción superficial por el carbón durante su producción (Mikhail, 1983)

Los poros pueden clasificarse en:

- Microporos, con radios de hasta 1.6 nm;
- Mesoporos, con radios desde 1.6 hasta 100 - 200 nm;
- Macroporos, con radios mayores de 100 - 200 nm (Dubinin, 1985).

El proceso de adsorción tiene lugar en los microporos, los cuales representan más del 90 % del área superficial del carbón activado. Los mesoporos y macroporos sirven como medio de transporte de las sustancias que van a ser adsorbidas. No obstante, se reporta (Díaz, 1985) que en las paredes de los mesoporos ocurre también cierta adsorción. En este caso, el mecanismo es por condensación capilar, mientras que la adsorción en los

microporos es por el potencial de adsorción originado fundamentalmente por las fuerzas de van der Waals.

Para que el carbón activado pueda ser utilizado eficientemente como adsorbente, debe presentar una serie de requerimientos que se muestran a continuación:

- Area superficial: 800 - 1 000m²/g;
- Carbono: 80 % (mínimo);
- Decoloración: 80 % (mínimo);
- Humedad: 10 % (máximo);
- Cenizas totales: 10% (máximo);
- Cenizas solubles: 1% (máximo);
- Sales de calcio solubles: 0.1% (máximo);
- Sulfatos: 0.1 % (máximo);
- pH 6.6 - 7.4 (Díaz, 1985).

1.2. Aplicaciones del carbón activado

Debido a su elevada capacidad adsorbente, los carbones activados tienen un empleo muy diverso en un gran número de procesos industriales, como son:

- Industria azucarera (como agente decolorante);
- En la fabricación de bebidas para mejorar su calidad;
- Adsorción de gases industriales nocivos a la salud, humo de combustión, polvos, etc. (Chou y Chiou, 1997);
- Procesos químicos y farmacéuticos como catalizador o como soporte del catalizador;
- Purificación de aguas albañales, residuales de la población y la industria;
- Recuperación de solventes líquidos contaminados con aceites o grasas en la industria;
- Eliminación de componentes dañinos en las aguas residuales industriales (como el tolueno en las fábricas de pinturas) y en las aguas subterráneas contaminadas por la filtración de la gasolina (Chatzopoulos, 1993);

- Decoloración y recuperación de colorantes de aguas residuales (Gupta y cols., 1997)
- Medio de defensa químico.

El empleo del carbón activado no se reduce a la industria, sino que también presenta grandes potencialidades en la esfera de la medicina. En el Centro Nacional de Toxicología se han obtenido buenos resultados en la evaluación de carbones activados de producción nacional (CIPIMM, 1992) para su administración por vía oral combinado con pepsina como un digestivo. Además, se valora su uso en el tratamiento del colesterol. En el Hospital "Hermanos Ameijeiras" se ha introducido el uso del carbón activado en varias funciones, tales como:

- Tratamiento de agua para diálisis;
- Campanas de extracción para vapores orgánicos;
- Separación de hormonas en sangre (CIPIMM, 1992).

Además de los usos tradicionales del carbón activado, la literatura reciente reporta otras aplicaciones muy novedosas y prometedoras, entre las que se encuentran:

- En minería, en nuevas tecnologías de extracción de oro (Brown, 1993 y van Deventer, 1994);
- Agente reductor para la remoción de óxidos de nitrógeno de los gases de combustión de automóviles y plantas industriales (Ahmed y cols, 1993 e Illán Gómez y cols., 1995);
- Catalizador, conjuntamente con carbonato de sodio en la deshidrogenación de metanol para la obtención de formaldehído anhidro (Shoujin y cols., 1993);
- Utilización de carbón activado en fibras en el tratamiento de agua y aire para la adsorción de micropolutantes como el fenol (Brasquet y cols., 1997)
- Recuperación de vapores de solventes diluidos de corrientes gaseosas antes de ser lanzados a la atmósfera (Schweiger, 1996)

El carbón activado se utiliza también como tratamiento previo a la degradación biológica de aguas residuales que contengan altas concentraciones de sustancias tóxicas (Kolb, 1997 y Galil, 1992).

La adsorción en carbón activado se usa para eliminar trazas de compuestos orgánicos de aguas y aguas residuales. Esas corrientes pueden tener cantidades significativas de

metales pesados, cuya adsorción puede competir con la adsorción de compuestos orgánicos. El carbón activado en polvo ácido tiene alta capacidad de adsorción de plata, plomo (II) y cobre (II), mientras que los básicos adsorben preferentemente cromo (Wilczak, 1993, Reed, 1993 y Reed, 1996).

Como puede constatarse el carbón activado tiene amplia aplicación pero se relaciona con este trabajo en particular su aplicación como agente decolorante en la industria azucarera. Este carbón una vez utilizado genera un residual contaminante que provoca serias afectaciones ambientales, aspecto que se profundiza a continuación.

1.3. Características del residual de carbón activado y las afectaciones que provoca

El agua residual generada en la etapa de decoloración de licores azucarados en el proceso de obtención de azúcar refinado se origina durante el lavado a presión de los filtros, y tiene una temperatura de 60°C al llegar al tanque donde se receptiona. La composición fundamental del efluente está dada por partículas de carbón que después de cumplir su función decolorante quedan retenidas en el filtro formando la capa de sedimentos. Al realizarse el lavado, el líquido resultante es una suspensión de color negro intenso. Además de las partículas de carbón, el residual contiene también sólidos como partículas finas de bagacillo, tierra filtrante y sustancias colorantes que no fueron retenidos o eliminados en etapas precedentes (Hernández, 1997).

Entre los daños causados por la acción contaminante del residual se encuentran:

- Afectación de la regulación osmótica de los organismos vivos.
- Intoxicación de moluscos y peces por falta de oxígeno.
- Obstrucciones en las regiones branquiales de los peces.
- Muerte o crecimiento reducido de almejas, ostras y mejillones.
- El cambio de color de las aguas provoca una disminución de la entrada de luz que perjudica el crecimiento de las plantas acuáticas.
- Alteración del sabor de los productos marinos.

En trabajos precedentes se valoró la eliminación de los sólidos del agua residual como una vía de solución para atenuar la contaminación (Junco, 1989). Una vez separados los sólidos, se hace necesario estudiar los métodos que permitan la reutilización del residual.

Para ello, la atención de los especialistas se centra en la recuperación del carbón activado sometiéndolo a un procedimiento de regeneración.

1.4. Regeneración del carbón activado agotado

Una de las características inherentes a la adsorción es el hecho de que el adsorbente se "agota" durante el proceso. El material disminuye su capacidad adsorbente debido a que su superficie resulta cubierta con el material previamente adsorbido (Nachabe, 1997). Este problema no es ajeno a los adsorbentes carbonosos utilizados en la decoloración de licores azucarados, los cuales disminuyen su eficiencia a medida que son utilizados. Además de saturarse con las moléculas de las sustancias colorantes adsorbidas, los poros se ocupan también con coloides y otras impurezas que no fueron separadas en procesos anteriores.

La vía más fácil de superar este problema es sustituyendo el carbón agotado por nuevo material virgen. Sin embargo, esta solución es la más cara. Varios autores coinciden en la afirmación de que la viabilidad económica de la aplicación del carbón activado en polvo depende de la existencia de un medio eficaz para su regeneración y recuperación una vez agotada su capacidad adsorptiva (Metcalf y Eddy, 1992 y Díaz, 1985).

El reciclado de carbón activado agotado proporciona los siguientes beneficios:

- Eliminación de la manipulación y movimiento de residuos con sus respectivos costos;
- Reducción significativa del volumen del carbón fresco a utilizar debido a su reposición por el carbón regenerado.

La regeneración tiene como propósito remover de la estructura porosa del carbón los materiales previamente adsorbidos, devolviéndole así la capacidad de adsorber impurezas. Este proceso puede lograrse alterando el equilibrio de adsorción mediante remoción térmica de adsorbatos volátiles, cambios en el equilibrio de ionización ácido-base y desplazamiento por extracción con solventes. (Loven, 1973 y Nachabe, 1997).

Basados en estos elementos existen diferentes métodos de regeneración que incluyen:

- Regeneración térmica;
- Regeneración química;
- Extracción con solventes;
- Regeneración biológica;

- Otros procedimientos de regeneración.

1.4.1 Regeneración térmica

Es éste el método de regeneración de carbón agotado más reportado en la literatura. Su origen data del año 1828, aunque sólo en 1950 se convirtió en un tratamiento establecido para el carbón granular. En los años 1970 comenzó a estudiarse la regeneración del carbón activado en polvo. Sin embargo, han existido dificultades técnicas para tratar térmicamente un polvo tan finamente dividido.

La bibliografía consultada (Loven, 1973; Harriot y Cheng, 1988) reporta que la regeneración térmica consta de las siguientes etapas:

- Secado: evaporación del agua a temperatura ambiente o a 105 – 110°C;
- Desorción térmica de los compuestos orgánicos adsorbidos. Se realiza a 100 – 260°C;
- Pirólisis de los compuestos orgánicos no volátiles y carbonización de los residuos de la pirólisis. La temperatura de este proceso oscila entre 204 y 800°C;
- Gasificación de los residuos pirolíticos.

Según Díaz (1985), con la regeneración térmica se logra recuperar alrededor del 95 al 98 % del carbón base. Otros reportes indican una recuperación inferior llegando solamente a 85 % (Ingeniería Sanitaria, 1992) o incluso a apenas 75 % (Harriot y Cheng, 1988). La capacidad adsorbente del carbón regenerado es siempre inferior a la del carbón virgen. En esta regeneración se presentan dos dificultades fundamentales:

- Pérdidas del 5 % del carbón debido a la manipulación de sólidos;
- El material adsorbido es oxidado en el horno y no puede recuperarse.

En el caso particular del carbón activado en polvo, se han utilizado a escala de planta piloto solamente el horno de lecho fluidizado y el reactor de transporte (Loven, 1973)

Un nuevo método de regeneración térmica de carbón activado agotado con fenoles, colorantes textiles y pesticidas se basa en la desorción con agua en condiciones subcríticas a 300°C (Salvador y Jiménez, 1996).

Recientemente se descubrió que la regeneración térmica de carbón activado granular puede ser afectada por los compuestos inorgánicos que pueden acumularse por intercambio iónico en sitios específicos del carbón. (Cannon y cols., 1997; Nowack and Cannon, 1997)

1.4.2 Regeneración química

La base de este proceso es la alteración de la naturaleza de las sustancias orgánicas adsorbidas mediante una reacción química de manera que se altere el equilibrio de adsorción o que ocurra una descomposición química. Dentro de este tipo de regeneración, el método más ampliamente usado es la extracción ácido-base. Con la aplicación de este método se han removido eficientemente compuestos como fenol, cresol, ácido acético y productos de la industria química y farmacéutica.

Se fundamenta en que la desorción de bases y ácidos orgánicos débiles en soluciones acuosas es muy dependiente del pH. Esto se debe a que la ionización tiene lugar con los ácidos orgánicos bajo condiciones básicas o con las bases orgánicas bajo condiciones ácidas y las sustancias fuertemente ionizadas son poco adsorbidas (Loven, 1973).

La solubilidad de adsorbatos orgánicos y las características superficiales de los adsorbentes bajo las condiciones de regeneración tienen una influencia muy fuerte en la eficiencia de la regeneración (Leng y Pinto, 1996).

Procedimientos similares dependientes del pH se usan en la recuperación del tecnecio de aguas residuales radiactivas (Yamagishi y Kubota, 1990).

1.4.3 Extracción con solventes

Esta regeneración debe ser considerada cuando un solvente es utilizado en el proceso de producción para desorber sustancias orgánicas presentes.

La separación del solvente de los compuestos sorbidos puede hacerse por destilación, extracción, decantación o precipitación. El solvente es recuperado para su reutilización en regeneraciones subsiguientes, mientras que los materiales desorbidos pueden ser reintroducidos en el proceso o refinados para el reuso o venta.

Este procedimiento ha sido probado a escala de laboratorio y piloto para la remoción de sustancias presentes en aguas residuales, tales como ácido acético, ácidos aromáticos, compuestos clorados aromáticos, fenoles, alcoholes y ésteres (Himmerstein, 1973).

La extracción con solventes puede servir también como un paso previo a la regeneración térmica. Se ha probado la regeneración de carbones agotados con clorofenoles mediante la utilización de solventes orgánicos. Por esa vía se logra extraer la fracción adsorbida

físicamente. Posteriormente, el carbón es calentado hasta 1073 K en presencia de un flujo de gas inerte, lográndose una mayor regeneración que cuando el proceso es solo térmico sin una extracción previa con solventes orgánicos (Ferro García y cols., 1996).

1.4.4 Regeneración biológica

La regeneración biológica o biorregeneración se define como un incremento en la capacidad adsorbente resultante del carbón activado agotado debido a la remoción del material adsorbido por la acción bacteriana.

Se ha mostrado que ocurren dos efectos de la actividad biológica: la biorregeneración de la superficie del carbón y la biodegradación del material en la corriente del influente (Chundyk, 1984 y de Jonge y cols., 1996).

Se ha estudiado la regeneración biológica del carbón activado en polvo agotado con compuestos aromáticos. En dependencia del origen del carbón (vegetal y mineral) y del tiempo de contacto, se logra restablecer la capacidad adsorbente de un 15 a un 85 %. Se observó que los microorganismos reducen la concentración del soluto forzando así la desorción (de Jonge y cols., 1996).

Los carbones regenerados biológicamente resultan muy prácticos en la preparación de agua potable de alta calidad. Una importante ventaja de ese método es el alargamiento de la vida útil de los filtros de carbón activado (Scholz y Martin, 1997).

1.4.5 Otros procedimientos de regeneración

La regeneración catalítica es un método al que sólo se le hace referencia en literatura muy reciente. Este método consiste en una modificación de la regeneración térmica, en la que se utilizan catalizadores que permiten que la regeneración ocurra a una temperatura inferior. Se ha reportado que la impregnación con una mezcla de óxidos de cobre (II), hierro (III) y cromo (III) facilita la regeneración de carbones agotados con fenoles. Utilizando esa mezcla de óxidos a una temperatura de 270°C se logró restaurar prácticamente toda la capacidad de adsorción inicial del carbón, mientras que en ausencia de los catalizadores y a la misma temperatura sólo es posible lograr entre un 25 y un 30 % de regeneración (Matatov Meytal y cols., 1997)

La radiación también puede ser utilizada en procesos regenerativos de carbón agotado. En un trabajo de muy reciente publicación, científicos chinos muestran que la regeneración de carbón activado por lavado ácido-alcalino puede ser mejorada si se combina con radiación (Wu y cols., 1998).

Un método propuesto recientemente para reactivar carbones agotados con fenoles se basa en el uso del ultrasonido. Los autores del método aseguran que el ultrasonido mejora notablemente la desorción de los fenoles del carbón. Las dosis empleadas fueron de 40 kHz y 1.44 MHz. Se observó que la desorción ultrasónica se favoreció por las bajas temperaturas, la aereación del medio líquido y el incremento de la intensidad del ultrasonido (Rege y cols., 1998).

Un reporte de hace apenas unos meses del Instituto de Minería y Metalurgia de la República Sudafricana indica que investigadores de esa institución se han propuesto seriamente desarrollar la regeneración del carbón agotado usando microondas. El análisis económico de los experimentos preliminares muestra que el costo de la regeneración por microondas aún no sería lo suficientemente bajo como para ser implementada a nivel industrial (Bradshaw y cols., 1998).

1.4.6 Regeneración de carbón activado en polvo

Se ha mencionado, que con respecto al carbón activado en polvo, los métodos de regeneración están más limitados. El principal inconveniente de la regeneración de carbón activado en polvo es que aún no existen tecnologías prácticamente viables (Nachabe, 1997). No obstante, se ha registrado que es aplicable la regeneración térmica mediante lecho fluidizado y reactor de transporte.

Un problema importante en el uso del carbón activado en polvo reside en que el mecanismo de regeneración del mismo no está bien definido (Ingeniería Sanitaria, 1992). Sin embargo, en cuanto este problema esté resuelto es previsible su aplicación de forma considerable.

Según Díaz (1985), la desventaja de la utilización del carbón activado en polvo radica en la contaminación que provocan sus residuales y en que es un carbón no recuperable, lo que confirma lo planteado anteriormente sobre la no-existencia de métodos de

regeneración para este tipo de carbón. Además, los métodos de regeneración descritos presentan algunas limitaciones importantes, las cuales se describen a continuación.

La regeneración térmica para carbón activado en polvo con utilización de los reactores de lecho fluidizado y de transporte probada a escala piloto está limitada por el alto consumo de combustible que se requeriría para generar los gases calientes que han de ponerse en contacto con el carbón agotado húmedo. Por las características de los compuestos adsorbidos en el proceso productivo que genera el residual de carbón a reactivar (los colorantes son melanoidinas, compuestos fenólicos) que pueden catalogarse como compuestos orgánicos no volátiles lo que conlleva la obtención de altas temperaturas (800°C). De lo reportado en la regeneración química es de vital importancia tener en cuenta el pH.

La regeneración por extracción con solventes no es conveniente en el caso del carbón activado agotado de refinerías, pues implica la utilización de reactivos que posteriormente deben ser separados por destilación u otro método, lo que encarece el proceso de reactivación. Además, este método, al igual que la regeneración biológica, requiere un largo tiempo de operación. Otros procedimientos de regeneración reportados recientemente no están acordes a las condiciones económicas de Cuba.

1.4.7. Variables que inciden en la regeneración

En trabajos previos se reporta la incidencia de diferentes variables en la desorción de colorantes (González, y Martínez, 1995; Hernández, 2000). Entre esas variables se encuentran la temperatura, la presión de trabajo, la velocidad de agitación, el pH y el tiempo de contacto.

Temperatura: La desorción de colorantes es favorecida a altas temperaturas. En este caso se trabaja con suspensiones. Se selecciona el rango de 70 a 85°C , pues valores superiores conducirían a evaporación (Hernández, 2000).

Presión: La adsorción es favorecida a altas presiones por lo que la desorción como fenómeno inverso debe favorecerse a bajas presiones (Treyball, 1991), lo que fue confirmado en un trabajo realizado previamente en la Universidad de Matanzas (Junco, 1989)

pH: Este parámetro puede ser usado para controlar las cargas de la superficie y consecuentemente la afinidad del adsorbato por el adsorbente. Para adsorbatos difíciles de solubilizar o fuertemente enlazados a la superficie se puede reducir la afinidad por el adsorbente mediante un cambio en la carga superficial, lo que inevitablemente mejoraría la eficiencia de regeneración (Leng y Pinto, 1996). Además, varios estudios han mostrado la influencia del pH alcalino en la desorción de diferentes sorbatos del carbón activado (Yamagishi y Kubota, 1990, Newcombe, 1990). Se ha sugerido realizar estudios de optimización sobre el efecto del pH en el proceso de adsorción/desorción (Newcombe, 1990). La influencia del pH en la desorción de colorantes se puede apreciar en la reactivación del carbón activado en polvo a nivel de laboratorio utilizando NaOH y HCl procedentes de la limpieza de evaporadores (López, 1994).

Es lógico suponer que la velocidad de agitación y el tiempo de contacto deben ejercer influencia sobre los fenómenos químicos y físico-químicos que tienen lugar durante la desorción de los colorantes del carbón activado. Es por eso que esos factores deben estar incluidos en la experimentación.

Conclusiones

En el análisis bibliográfico realizado se puede constatar que, a pesar de que el carbón activado en polvo es muy útil en la refinación de azúcar, no existe una tecnología establecida a escala industrial para su regeneración una vez que ha sido agotado. Se investigaron los distintos factores que afectan la desorción de colorantes, y sobre los cuales se puede actuar para lograr la regeneración del carbón activado en polvo agotado. Una estrategia de regeneración de carbón activado en polvo agotado debe considerar la combinación de la separación por filtración a vacío y el calentamiento de la suspensión previamente ajustada a un pH alcalino.

Bibliografía

1. Ahmed S. N., Stenied, J.M., Dervyshire, F.J., Baldivin, R.M. (1993) Activated carbons for the removal of nitric oxide. *Fuel Processing Technology* **34**: 123-136

2. Alvarez, S.G., Romero, L.T. (1995) Contaminación y Medio Ambiente. Editorial Científico Técnica, La Habana.
3. Babor, J. A. (1970) Química General Moderna. Tomo II. Edición Revolucionaria. La Habana.
4. Bradshaw, S.M., van Wyk, E., de Swardt, J.B.(1998) Microwave heating principles and the application to the regeneration of granular activated carbon. *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*, **98**, 201-210.
5. Brasquet, C. Le Cloirec, P. (1997) Adsorption onto activated carbon fibers: Application to water and air treatments. *Carbon*. **35** (9): 1307-1313.
6. Brown, J. R., Deschenes, G. (1993) Characterization of the gold complex adsorbed on activated carbon from fluoride, cyanide and thiourea. CIM Bulletin.
7. Cannon, F.S., Snoeyink, V.L., Lee, R., Dagois, G. (1997) Effect of iron and sulfur on thermal regeneration of granular activated carbon. *J. Am. Water Works Association*. **89** (11): 111-122.
8. CIPIIMM (1992) Resumen sobre las investigaciones, producción y aplicación de carbón activado del quinquenio 1986 – 1990.
9. Chatzopoulos, D., Varma, A. (1993) Activated carbon adsorption and desorption of toluene in the aqueous phase. *AIChE Journal*. **39**(12): 2027 - 2041.
10. Chou, M.-S., Chiou, J.-H. (1997) Modeling effect of moisture on adsorption capacity of activated carbon for VOCs. *Journal of Environmental Engineering*. 437-443.
11. Chundyk, W.A. (1984) Bioregeneration of activated carbon saturated with phenol. *Environ. Sci. Tech.* **18** (1).
12. De Jonge, R. J., Breure, M., van Andel, J. (1996) Bioregeneration of powdered activated carbon loaded with aromatic compounds. *Water Research*. **30** (4): 875-882.
13. Díaz, E. (1985). Tecnología Azucarera II. La Habana, Editorial Pueblo y Educación. P. 230-231.
14. Dubinin (1985) The Modern Theory of Capillarity. Academic Verlag. Berlin.
15. Enciclopedia Universal Sopena (1977) Tomo 2, pág. 1676-1677. Barcelona.
16. Ferro García, M., Rivera Utrilla, J., Bautista Toledo, I., Moreno Castilla, C. (1996) Chemical and thermal regeneration of an activated carbon saturated with chlorophenols. *J. of Chem. Technol. And Biotechnol.* **67** (2): 183-189.

17. Galil, N., Rebhun, M. (1992). PAC combined with biological treatment to remove organic matter containing cresols and xylenols. *J. Environ. Sci. Health.* **27**(1).
18. González Gómez, O.; Martínez, I. (1995). Influencia de algunos parámetros en la desorción del carbón activado. Trabajo de diploma. Universidad de Matanzas.
19. Gordon, L.V., Skvortzov, S.O., Lisov, V.I. (1988) Tekhnologija y Oborudovanie Lesokhimitscheskich Proizvodstv. Lesnaja Promyshlennost`. Moscú.
20. Gupta, V. K., Srivastava, S.K., Mohan,D. (1997) Equilibrium uptake and process optimization for the recovery of malachite green from wastewaters using activated carbon. *Ind. and Eng.-Chem.-Research.* **36**(6): 2207-2218.
21. Harriot, P. and Cheng, A. (1988) Kinetics of spent activated carbon regeneration. *AIChE Journal*, **34**, 10.
22. Hernández, E. (1997) Recuperación del carbón activado vertido como residual de la industria azucarera. Examen de mínimo de Problemas Sociales de la Ciencia. Universidad de Matanzas
23. Hernández, E. (2000) La regeneración del carbón activado en polvo como una vía de solución a la afectación ambiental que provoca su vertimiento. Tesis de Maestría. Universidad de Matanzas.
24. Himmerstein, R.A., Wilmington, D. (1973). Activated carbon. Economic factors in granular carbon thermal regeneration. *Chem. Eng. Progress.* **69**(11).
25. Illán Gómez, M. J. (1995) NO Reduction by activated carbon. Catalysis by transition metals. *Energy & Fuels.* **9** (6): 976-983.
26. Junco, J.Z. (1989) Caracterización, tratamiento y aprovechamiento de efluentes industriales en el litoral norte de la provincia de Matanzas. Tesis en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas. Universidad de La Habana.
27. Kolb, F., Wilderer, P. (1997) Activated carbon sequencing batch biofilm reactor to treat industrial wastewater. *Water Sc. And Techn.*, **35**, 169-176.
28. Lavarack, B.P. (1997) Chemically activated carbons from sugar cane bagasse fractions. *Hungarian Journal of Industrial Chemistry* **25**(2):157-160.
29. Leng, C.C., Pinto, N.G. (1996) An investigation of the mechanisms of chemical regeneration of activated carbon. *Industrial and Engineering Chemistry Research.* **35** (6): 2024-2031.

30. López, A. (1994) Regeneración del carbón activado en polvo con residuales de la industria azucarera. I Encuentro Internacional sobre Ecología y Desarrollo. Universidad de Matanzas.
31. Loven, A. (1973) Activated carbon. Perspectives on carbon regeneration. *Chem. Eng. Progress* **69** (11)
32. Marqués, F. (1999) Estudio de la posibilidad de producir carbón activado a partir de serrín y residuos forestales. Tesis Doctoral. Universidad de Pinar del ío.
33. Matatov Meytal, Y.I. Sheintuch, M., Shter, G.T., Grader, G.S. (1997) Optimal temperatures for catalytic regeneration of activated carbon. *Carbon*, **35**, 1527-1531.
34. Metcalf, Eddy (1992) Ingeniería Sanitaria, El carbón activado y su aplicación. 359 – 365.
35. Mikhail, R. (1983) Microstructural and thermal analysis of solid surfaces. Pag.5. New York.
36. Nachabe, A. (1997) Joint Service Pollution Prevention Oportunity Handbook. No.2.
37. Newcombe, G. (1990) Chemical regeneration of activated carbon: preliminary studies. Report No. UWRAA020. Urban Water Research of Australia. Melbourne.
38. Nowack K.O., Cannon, F.S. (1997) Control of calcium buildup in granular activated carbon: Effect of iron coagulation. *Carbon*, **35**, 1223-1237.
39. Parker, I., Hughes, D. (1998) Activated carbon. Water Treatment Primer. Civil Engineering Department, Virginia Tech. Disponible en Internet en: www.ce.vt.edu/enviro2/wtprimer/actcarbon/actcarbon.htm
40. Reed, B. E., Jamil, M., Thomas, B. (1996) Effect of pH, empty bed contact time and hydraulic loading rate on lead removal by granular activated carbon columns. *Water and Environment Research*. **68** (5): 877-882.
41. Reed, B.E., Jeser, J., Matsumoto, M. (1993) Acid basic characteristics of powdered activated carbon surfaces. *J. Environ. Eng.* **119**(3):585-590.
42. Rege, S.U., Yang, R.T., Cain, C.A. (1998) Desorption by ultrasound: Phenol on activated carbon and polymeric resin. *AIChE Journal*. **44** (7): 1519-1528.
43. Rigola, M. (1998) Producción más limpia. Primera edición. Rubes Editorial, S.L. Barcelona.

44. Salvador, F., Jiménez, C. S. (1996) A new method for regenerating activated carbon by thermal desorption with liquid water under subcritical conditions. *Carbon*. **34** (4); 511-516.
45. Scholz, M., Martin, R.J. (1997) Ecological equilibrium on biological activated carbon. *Water Research*. **31** (12): 2959-2968.
46. Schweiger, T.A.J. (1996) A design method for adsorption bed capacity: steam regenerated adsorbers. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, **35**, 1929-1934.
47. Shoujin, S.U., Prairie, M.R., Renken, A. (1993) Promoting effect of active carbons on methanol dehydrogenation. *App. Catalysis*, **95**, 131-142.
48. Treyball, R. (1991) Operaciones básicas de transferencia de masa. 2da Edición. Editorial Revolucionaria. La Habana.
49. van Deventer, J.S.J., van der Merw, P.F. (1994) Factors affecting the election of gold cyanide from activated carbon. *Mineral Engineering* **7**(1):71-96.
50. Vyrodov (1987) Tekhnologija Lesokhimicheskikh Proizvodstv. Lesnaja Promyshlennost. Leningrad.
51. Warhurst, A.M. (1996) The production of activated carbon for water treatment in Malawi from the waste seeds husks of *Moringo oleifera*. *Water Sc. Techn.* **34**, 177-184.
52. Wilczak, A., Keinath, T.M (1993) Kinetics of sorption and desorption of copper (II) and lead (II) on activated carbon. *Water Environment Research*, **65** (3)
53. WT – Activated carbon (1998) Disponible en Internet en:
www.ce.vt.edu/enviro2/wtprimer/actcarbon/actcarbon.html
54. Wu, M.H., Bao, B.R., Zhou, R.M., Zhu, J.L., Hu, L.X. (1998) The regeneration of polluted activated carbon by radiation techniques. *Radiation Physics and Chemistry*, **53**, 431-435.
55. Yamagishi, I., Kubota, M. (1990) Desorption of technetium from active carbon with alkaline thiocyanate solution. *Journal of Nuclear Science and Technology*. **27**: 743 – 749.