



USO DE BIORREACTORES PARA CONTROLAR LA CONTAMINACIÓN DEL AIRE

U.S. Environmental Protection Agency

USO DE BIORREACTORES PARA CONTROLAR LA CONTAMINACIÓN DEL AIRE

Preparado por

*The Clean Air Technology Center (CATC)
U.S. Environmental Protection Agency (E143-03)
Research Triangle Park, North Carolina 27711, EE.UU.*

*U.S. Environmental Protection Agency
Office of Air Quality Planning and Standards
Information Transfer and Program Integration Division
Information Transfer Group (E143-03)
Research Triangle Park, North Carolina 27711, EE.UU.,*

RENUNCIA DE RESPONSABILIDAD

Este reporte ha sido revisado por la *Information Transfer and Program Integration Division*, división de transferencia de información e integración de programas, de la *Office of Air Quality Planning and Standards*, oficina de planificación y normas de calidad del aire, de la *U.S. Environmental Protection Agency*, agencia de protección ambiental de EE.UU., y aprobado para su publicación. Esta aprobación no significa que el contenido de este reporte refleje los puntos de vista y las políticas de la *U.S. Environmental Protection Agency*. No debe interpretarse que los nombres comerciales o productos comerciales mencionados constituyan una aprobación o recomendación para el uso. Están disponibles copias de este reporte del *National Technical Information Service*, servicio nacional de información técnica, *U.S. Department of Commerce*, departamento de comercio de EE.UU., 5285 Port Royal Road, Springfield, Virginia 22161, número de teléfono (800) 553-6847.

PRÓLOGO

El **Clean Air Technology Center (CATC)**, centro de tecnología para el aire limpio, sirve como recurso en todas las áreas de las tecnologías emergentes y existentes de prevención y control de la contaminación del aire, y brinda acceso público a datos e información sobre su uso, eficacia y costo. Asimismo, *CATC* proporcionará asistencia técnica, incluido el acceso a la base de conocimientos de la *EPA*, a agencias del gobierno y a otros terceros, según lo permitan los recursos, relacionada con la factibilidad técnica y económica, operación y mantenimiento de dichas tecnologías.

Acceso público y transferencia de información

Página de bienvenida en *INTERNET* / Red Mundial
<http://www.epa.gov/ttn/catc>

Comunicaciones

Línea de información de *CATC*: (919) 541-0800 (inglés)
Línea de información de *CATC/CICA*: (919) 541-1800 (español)
Gratis (800) 304-1115 (español)
FAX: (919) 541-0242
Correo electrónico: catcmail@epa.gov

Recursos de datos

- *RACT/BACT/LAER Clearinghouse (RBLC)*
Consultas, visualización y descarga de datos seleccionados sobre
 - Aplicaciones de tecnología específica de origen
 - Requisitos normativos sobre contaminación del aire
- **PRODUCTOS DE *CATC***
Descarga de reportes técnicos, información sobre costos y software

Programas y centros relacionados

- ***CICA - U.S.-Mexico Border Information Center on Air Pollution***, centro de información sobre contaminación de aire para la frontera entre EE.UU. y México
- ***SBAP - Small Business Assistance Program***, programa de asistencia para empresas pequeñas
- ***International Technology Transfer Center for Global Greenhouse Gases***, centro internacional de transferencia de tecnología para los gases de efecto de invernadero global

RECONOCIMIENTOS

Este boletín técnico fue posible gracias a los esfuerzos diligentes y persistentes de Lyndon Cox y Dexter Russell, Empleados Ambientales Mayores del *Clean Air Technology Center (CATC)*. Lyndon y Dexter hicieron un trabajo excepcional en identificar fuentes de información, recopilar datos relativos y redactar este boletín. El *CATC* también agradece los comentarios útiles y oportunos, y la cooperación, de los siguientes revisores expertos:

Charles Darvin

Air Pollution Control Division, división de control de contaminación del aire
National Risk Management Research Laboratory, laboratorio nacional de investigación sobre administración de riesgos
Office of Research and Development, oficina de investigación y desarrollo
U.S. EPA

Mohamed Serageldin

Emission Standards Division, división de normas de emisión
Office of Air Quality Planning and Standards, oficina de planificación y normas de calidad del aire
Office of Air and Radiation, oficina de aire y radiación
U.S. EPA

Asimismo, el *CATC* agradece a los individuos, empresas e instituciones que suministraron la información sobre tecnología de biorreacción utilizada para preparar este Boletín Técnico. Los contribuidores se indican en la sección de REFERENCIAS de este boletín.

CONTENIDO

TEMA	Página
RENUNCIA DE RESPONSABILIDAD.....	ii
PRÓLOGO.....	iii
RECONOCIMIENTOS.....	iv
CONTENIDO.....	v
FIGURAS.....	vi
TABLAS.....	vii
INTRODUCCIÓN.....	1
¿Qué es la biorreacción?	1
¿Por qué es importante la biorreacción?	1
DESCRIPCIÓN GENERAL.....	2
¿Cómo funcionan los biorreactores?	2
FACTORES QUE AFECTAN EL RENDIMIENTO:	
VARIABLES Y LIMITACIONES.....	3
Temperatura.....	3
Humedad.....	4
Cuidado y alimentación.....	5
Acidez	5
Población de microbios.....	6
PROCESOS DEL BIORREACTOR.....	7
Biofiltros.....	8
Filtro biopercolador.....	12
Biodepurador.....	16
Otras tecnologías del biorreactor.....	18
OPCIONES DE CONTROL Y COMPARACIONES DE COSTOS.....	18
Dispositivos de control con combustión.....	20
Dispositivos de control sin combustión.....	22
Comparaciones de costos.....	23
ASUNTOS SOBRE NORMAS.....	24

CONTENIDO (continuación)

CONCLUSIONES.....	25
REFERENCIAS.....	26
APÉNDICE A: PREMISAS DE COSTO OPERATIVO DEL DISPOSITIVO DE CONTROL.....	27

FIGURAS

1. Biofiltro básico.....	2
2. Biofiltro con reciclado de emisiones.....	9
3. Biofiltros en serie, horizontalmente.....	9
4. Biofiltro en el suelo.....	10
5. Fotografía de cuatro biofiltros que se están instalando en Arlington, TX en la planta del sistema efluentes de central regional.....	10
6. Filtro percolador.....	13
7. Filtro biopercolador.....	14
8. Biodepurador.....	16
9. Modos de operación del oxidante térmico regenerativo.....	21
10. Oxidante térmico recuperativo de tres fases.....	21
11. Oxidante catalítico.....	22

CONTENIDO (continuación)

Tablas

1. Tiempos de reaclimatación del biorreactor después de períodos sin uso.....	7
2. Resumen de características de diseño de biofiltros existentes.....	11
3. Costo del biofiltro por unidad de volumen de flujo de aire.....	12
4. Características generales de los filtros biopercoladores.....	14
5. Características de diseño para filtros biopercoladores existentes.....	15
6. Costo del filtro biopercolador por unidad de volumen de flujo de aire.....	15
7. Características de diseño de los biodepuradores.....	18
8. Costo de control estimativo para procesos térmicos y catalíticos.....	23
9. Costos de control al usar las biorreacciones.....	24

Esta página se ha dejado en blanco intencionalmente

USO DE BIORREACTORES PARA CONTROLAR LA CONTAMINACIÓN DEL AIRE

INTRODUCCIÓN

Los biorreactores utilizan un proceso natural tan antiguo como la vida misma. Para poder sobrevivir, cualquier ser viviente debe tener una fuente de energía (alimento) y agua (humedad). La manera en que se usan estas necesidades para eliminar contaminantes de corrientes de aire contaminadas es el tema de este reporte. -

¿Qué es la biorreacción?

En la contaminación del aire, la biorreacción simplemente es el uso de microbios para consumir contaminantes de una corriente de aire contaminado. Casi cualquier sustancia, con la ayuda de microbios, se descompondrá (desintegrará), dado el medio ambiente apropiado. Esto es especialmente cierto para los compuestos orgánicos. Sin embargo, ciertos microbios también pueden consumir compuestos inorgánicos, tales como el sulfuro de hidrógeno y los óxidos de nitrógeno.

¿Por qué es importante la biorreacción?

En pocas palabras: ¡SU COSTO! El costo de capital de una instalación por biorreacción es por lo general una mera fracción del costo de una instalación de un dispositivo de control tradicional.^a Los costos operativos también son generalmente considerablemente menores que los costos de la tecnología tradicional. Las unidades de control térmico y catalítico consumen grandes volúmenes de combustible costoso. Los biorreactores utilizan únicamente cantidades pequeñas de energía eléctrica para conducir dos o tres motores pequeños. Normalmente, los biorreactores no requieren mano de obra a tiempo completo, y los únicos suministros operativos necesarios son pequeñas cantidades de macronutrientes. Los biofiltros, el tipo de biorreactor más común, por lo general emplean lechos (medios sobre los cuales viven los microbios) fabricados de materiales orgánicos que ocurren naturalmente (materiales cortados de parques y jardines, turba, corteza, astillas de madera o abono) que son consumidos lentamente por la biomasa (es decir, microbios). Estos lechos orgánicos por lo general pueden suministrar la mayoría de los macronutrientes necesarios para sustentar la biomasa. Los lechos se deben reemplazar cada 2 a 5 años (Ref. 1), dependiendo de la opción de material del lecho.

La biorreacción es un proceso "verde," mientras que los enfoques tradicionales no lo son. La combustión de cualquier combustible generará óxidos de nitrógeno (NO_x), materia particulada, dióxido de azufre (SO₂) y monóxido de carbono (CO). Los biorreactores por lo general no generan estos contaminantes ni ningún contaminante peligroso.^b Los productos de una biorreacción que consume hidrocarburos son agua y dióxido de carbono (CO₂).

^a Los dispositivos de control tradicionales incluyen oxidación térmica y catalítica, adsorción y absorción de carbono (depuradores)

^b Los biorreactores en los estados norteros podrían requerir el calentamiento de las emisiones a fin de obtener condiciones óptimas. La fuente de este calor podría generar contaminantes por combustión

Los biorreactores funcionan bien, pero los microbios son meticulosos con respecto a lo que comen. Los microbios necesitan la concentración correcta de contaminante, temperatura, humedad y pH. Existen muchas oportunidades para cometer errores en el diseño y en la operación de un sistema de biorreacción. Sería importante que todos aquellos que piensen acerca de la biorreacción conversen sobre su situación con un representante del fabricante o un experto en el tema. Si una situación particular de control de la contaminación del aire cumple con los requisitos necesarios, los beneficios en el costo pueden ser sustanciales.

DESCRIPCIÓN GENERAL

¿Cómo funcionan los biorreactores?

Los microbios han habitado la Tierra desde el momento en que la Tierra se enfrió lo suficiente como para permitir la existencia de cualquier forma de vida. Los microbios tienen un ciclo de vida simple: nacen, comen, crecen, se reproducen y mueren. Su dieta se basa principalmente en compuestos de carbono, agua, oxígeno (para reacciones aeróbicas) y macronutrientes. Los biorreactores usan microbios para eliminar contaminantes de las emisiones, al consumir dichos contaminantes. El concepto es simple, pero la ejecución puede ser bastante complicada.

Los biorreactores se han usado por centenares de años para tratar aguas cloacales y otros desechos olorosos transportados por el agua. Hace aproximadamente sesenta años, los europeos comenzaron a usar los biorreactores para tratar el aire contaminado (olores), en particular, las emisiones provenientes de las plantas de tratamiento de aguas cloacales y las plantas extractoras de grasa. El proceso inicial utiliza un dispositivo denominado "biofiltro." Un biofiltro es por lo general una caja rectangular que contiene un pleno encerrado en el fondo, un bastidor de soporte arriba del pleno, y varios pies de medios (lecho) arriba del bastidor del soporte. Vea la Figura 1.

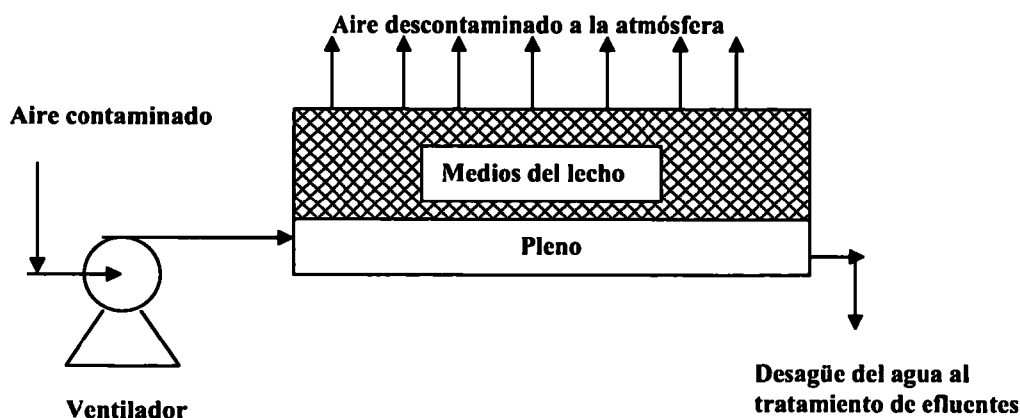


Figura 1. Biofiltro básico

Se utiliza un gran número de materiales para los medios del lecho, turba, abono proveniente de desechos de parques y jardines, corteza, tierra gruesa, grava o formas plásticas (Ref. 2). A veces se mezclan con los medios del lecho conchas de ostra (para neutralizar la

acumulación de ácido) y fertilizante (para macronutrientes). El bastidor de soporte se perfora para permitir que el aire del pleno se desplace hacia los medios del lecho para entrar en contacto con los microbios que viven en el lecho. Las perforaciones también permiten que se drene el exceso de humedad condensada del lecho hacia el pleno.

Se utiliza un ventilador para recoger el aire contaminado de un edificio o proceso. Si el aire es demasiado caliente, demasiado frío, demasiado seco o demasiado sucio (con sólidos suspendidos), podría ser necesario pretratar la corriente de aire contaminada para obtener las condiciones óptimas antes de introducirla al biorreactor. El aire contaminado se transmite a un pleno por medio de un conducto. A medida que fluyen las emisiones a través de los medios del lecho, los contaminantes son absorbidos por la humedad en los medios del lecho, entrando en contacto con los microbios.^c Los microbios reducen las concentraciones de contaminante al consumir y metabolizar los contaminantes. Durante el proceso de digestión, las enzimas en los microbios convierten los compuestos en energía, CO₂ y agua. El material no digerible queda como remanente y se convierte en residuo.

Ésta es una explicación muy simple y breve sobre cómo funciona un biorreactor. En la vida real, las cosas se complican bastante. Las variables que afectan la operación y eficiencia de un biorreactor incluyen: temperatura, pH, humedad, mezcla de contaminantes, concentración de contaminantes, alimentación de macronutrientes, tiempo de residencia, medios de lecho compactado y canalización de gas. Éstas son variables críticas para las cuales deben determinarse, controlarse y mantenerse las condiciones óptimas. En la parte principal de este reporte, se presenta una explicación completa de estos procesos.

¿Un biorreactor es la solución correcta para su situación? Ésta no es una pregunta fácil de responder. El propósito de este reporte es brindar herramientas que usted puede utilizar para determinar si una corriente de aire contaminado es un buen candidato para tratamiento por biorreacción. ¿Por qué siquiera debiera preocuparse por esto? La instalación y operación de los biorreactores es mucho menos cara que la de las tecnologías tradicionales de control y, en muchos casos, los biorreactores alcanzan las mismas eficiencias logradas por las tecnologías tradicionales de control.

FACTORES QUE AFECTAN EL RENDIMIENTO: VARIABLES Y LIMITACIONES

Dado que los biorreactores utilizan cultivos vivos, se ven afectados por muchas variables en su medio ambiente. A continuación se indican las variables y limitaciones que afectan el rendimiento de todos los biorreactores, independientemente del tipo de proceso.

Temperatura

Todas las variables discutidas aquí son importantes. Sin embargo, la variable más importante que afecta las operaciones de un biorreactor probablemente es la temperatura. Un chorro de aire caliente puede matar totalmente una biomasa con mayor rapidez que cualquier

^c Los compuestos insolubles en agua no son buenos candidatos para esta tecnología

otro accidente. La mayoría de los microbios puede sobrevivir y florecer en un rango de temperaturas de 60 a 105°F (30 a 41°C) (Ref. 3). Es importante monitorear la temperatura del lecho por lo menos una vez al día, pero cada ocho horas sería incluso más seguro. Una alarma de alta temperatura en la entrada de las emisiones también es una buena precaución de seguridad.

Cuando las emisiones provenientes de un proceso son demasiado calientes, los operadores con frecuencia hacen pasar las emisiones calientes a través de un humidificador que enfría los gases por medio del enfriamiento evaporativo. Éste es el método más económico disponible para enfriar las emisiones de 200 a 300°F (93 a 149°C) a temperaturas de menos de 105°F (41°C). Además del efecto de enfriamiento, este proceso también aumenta el contenido de humedad (humidifica la corriente de emisiones), un efecto colateral deseable.

Si bien un chorro de aire realmente caliente es la variable más letal para los microbios, el aire frío también interrumpe el crecimiento de los microbios, pero no los mata. El aire frío puede reducir la actividad de los microbios al punto que dejen de consumir contaminantes y pasen a un estado de animación suspendida. Incluso el congelamiento no mata a los microbios. Después de descongelarse, pueden reaclimatarse en un período relativamente breve. Para lograr una eficiencia óptima durante los meses de invierno, podría resultar necesario calentar las emisiones usando métodos directos o indirectos. Si se requiere calentamiento, busque primero una fuente de calor residual tal como un exceso de vapor, purga de la caldera o calor residual por enfriamiento del producto. Al igual de lo que sucede con las emisiones de enfriamiento, analice su fuente cuidadosamente para asegurarse de que no se agregue nada a la corriente de emisión que perjudique a los microbios en el biorreactor, puesto que, de ser así, se agregará a la carga total de contaminación. Asimismo, algunos operadores, especialmente en los estados norteros, aíslan el exterior del biorreactor para reducir la pérdida de calor.

Humedad

La segunda variable más crítica es la humedad del lecho. Los microbios necesitan humedad para sobrevivir y la humedad crea la biopelícula que elimina (absorbe) contaminantes de una corriente de aire, de modo que puedan ser asimilados por los microbios. Los problemas de baja humedad pueden corregirse al hacer pasar las emisiones a través de un humidificador. Al tener emisiones próximas a la saturación (100 % de humedad relativa) resolverán la mayoría de los problemas de lecho seco. No es necesario que los humidificadores sean elegantes recipientes de proceso de acero inoxidable, comprados en una tienda. Pueden construirse de un tanque viejo sobrante de plástico reforzado con fibra, o bien se puede construir de paneles de fibra de vidrio con una estructura de madera. El diseño debería incluir varias filas de tuberías cerca de la parte superior del recipiente, con cabezales aspersores instalados todo a lo largo, y válvulas de encendido/apagado en cada tramo de tubería para proporcionar algo de control de la humedad.

Los biofiltros por lo general se operan húmedos, sin agua corriente ni estancada. Una baja humedad, durante períodos breves, no matará a los microbios, pero sí reducirá en gran medida la eficiencia. La eficiencia será menos que la óptima mientras los microbios se recuperan (reaclimatan) después de un período de condiciones de lecho seco.

Por otra parte, la inundación de un reactor con agua causará un incremento de la caída de presión a través del lecho (agregando una carga adicional al soplador) y podría causar una pérdida de eficiencia debido a la canalización que se desvía de la biomasa. La canalización también podría causar que se desplomen los medios del lecho. Para lograr una operación uniforme, han de evitarse estas dos condiciones.

Es importante recordar que el agua es un subproducto de una biorreacción. Si las emisiones están saturadas al ingresar al proceso, habrá condensación de agua en los medios del lecho. Siempre proporcione espacio en el pleno para recoger el agua y un método para eliminarla del pleno. El rango de humedad óptimo para los medios del lecho es de 40 a 60 por ciento de agua (Ref. 3). Una manera de monitorear el contenido de humedad del lecho de manera continua es montar el bastidor de soporte en las celdas de carga con un indicador.

Cuidado y alimentación

Además de lograr una temperatura cómoda y un medio ambiente húmedo, los microbios necesitan una dieta de nutrientes balanceados para sobrevivir y propagarse. Los contaminantes proporcionan la fuente principal de alimento y energía, pero los microbios también requieren macronutrientes para sustentar su vida. La desintegración de los medios de un lecho orgánico puede proporcionar la mayoría de los macronutrientes. Sin embargo, si un lecho es deficiente en ciertos nutrientes, los microbios dejarán de crecer y podrían comenzar a morir.

El nitrógeno es un nutriente esencial para el crecimiento microbiano. Los microbios utilizan el nitrógeno para construir las paredes celulares (las cuales contienen aproximadamente el 15 por ciento de nitrógeno) y el nitrógeno es un constituyente principal de proteínas y ácidos nucleicos. Los microbios son capaces de utilizar todas las formas solubles de nitrógeno, pero no todo el nitrógeno está disponible para su reutilización. Algunos productos de nitrógeno provenientes de los procesos de digestión son gases (óxidos de nitrógeno y amoníaco), y pequeñas cantidades de éstos saldrán del proceso junto con las emisiones. No obstante ello, la mayor parte de los vapores que contienen nitrógeno se reabsorbe en el líquido y es consumido por los microbios. Además, algunos productos de nitrógeno forman compuestos solubles en agua, y se eliminan del sistema por lixiviación con agua condensante.

Otros macronutrientes esenciales incluyen el fósforo, potasio, azufre, magnesio, calcio, sodio y hierro. Puede agregarse nitrógeno, fósforo y potasio (el código NPK en las etiquetas de los fertilizantes) al incorporar fertilizantes de uso agrícola en los medios del lecho. Pueden adquirirse macronutrientes menos solubles, tales como el magnesio, calcio, sodio y hierro, en pequeñas cantidades en tiendas de venta de forraje y semillas. El contenido de nutrientes de un lecho debe revisarse periódicamente presentando muestras a un laboratorio de suelos para su análisis.

Acidez

La mayoría de los biorreactores funciona mejor cuando el pH del lecho es cercano a 7, o neutro.^d Algunos contaminantes forman ácidos al descomponerse. Algunos ejemplos de estos

^d Los biorreactores que tratan emisiones que contienen azufre o compuestos de azufre funcionan mejor cuando el pH está en el rango de 1 a 2 (Ref. 4)

compuestos son: sulfuro de hidrógeno, compuestos orgánicos de azufre, y halógenos (cloro, flúor, bromo y yodo). La producción de ácidos con el correr del tiempo disminuirá el pH y finalmente destruirá los microbios. Si un proceso emite contaminantes que producen ácidos, se deberá desarrollar un plan para neutralizar estos ácidos.

Existen varias técnicas disponibles para neutralizar los lechos. Algunas pueden incorporarse en la especificación para el material del lecho. Una de las técnicas más simples es mezclar conchas de ostra con los medios del lecho. Con el tiempo, las conchas se disolverán y deberán reemplazarse (Ref. 5). La cantidad de tiempo que duren las conchas sin reemplazo dependerá de cuánto ácido se produce. Otra técnica simple es instalar mangueras de remojo para jardines en los medios de empaque durante la construcción (Ref. 4). Periódicamente, se puede introducir una solución diluida de ceniza de sosa (carbonato de sodio, Na_2CO_3) en un lecho cuando el pH comience a bajar. Otra técnica es rociar una solución diluida de carbonato de soda comercial sobre la parte superior del lecho. Sin embargo, esto probablemente resulte menos eficaz que humedecer el núcleo de un lecho con mangueras de remojo.

Población de microbios

Algunos proveedores de equipos pueden simular la corriente de emisión de un cliente en su laboratorio y realizar pruebas de biorreacción para determinar cuáles cepas de microbios funcionan mejor en una mezcla particular de contaminantes. Pueden luego inocular los medios del lecho con dichas cepas y arrancar con los microbios "correctos" en posición. Otros permitirán que la naturaleza siga su curso comenzando con medios del lecho que contengan una gran variedad de microbios vivos, tales como abono, turba o fangos municipales activados. Las cepas que prosperan en los contaminantes de una corriente de emisión terminarán por dominar el medio ambiente del lecho. El método natural demorará un poco más para aclimatarse a fin de lograr una eficiencia óptima pero, debido a la diversidad de las cepas de microbios, resultará más adaptable a largo plazo. Los microbios específicos que se desarrollan en el laboratorio serán más susceptibles a cambios en el medio ambiente que los microbios generados de manera natural.

Los períodos de tiempo de inactividad resultarán en un cambio en la composición de una población de microbios. Estos cambios afectarán el rendimiento del biorreactor y se requerirá tiempo para que la población de microbios logre reaclimatarse. Martin y Loehr (Ref. 5) se dedicaron a este tema y realizaron experimentos en la Universidad de Texas (1996). Querían determinar los períodos de reaclimatación después de períodos sin uso de 1.67 días, 3.73 días y 2 semanas. Estos períodos estaban destinados a coincidir con un cierre de planta durante un fin de semana de 2 días, un feriado de 4 días y una parada total de la planta de dos semanas. Durante períodos sin uso, los biorreactores se trataron de dos maneras: estancados (sin flujo de aire a través de ellos), y humidificados (se pasa aire saturado a través de ellos). El tiempo requerido para aclimatar los microbios en el biorreactor inicialmente y reaclimatarlos ^c (arrancar) después de períodos sin uso se muestran en la Tabla 1.

^c Los autores definen la "reaclimatación" como el tiempo que demora un sistema en alcanzar una eficiencia de eliminación del 98 %.

Experimento	Prueba 1 (días)	Prueba 2 (días)	Prueba 3 (días)	Prueba 4 (días)	Prueba 5 (días)
Período sin uso ^a	Arranque inicial	1.67	3.73	3.73	14.0
Humidificación ^b	No	No	No	Sí	Sí
Tolueno ^c	4.00	0.46	1.00	0.39	1.80
Benceno ^d	7.25	0.17	0.21	0.21	2.75

^a El número de días en que el biorreactor estaba fuera de servicio

^b "Sí" indicaba que el sistema de humidificación estaba en funcionamiento durante el periodo sin uso

^c Resultados de reaclimatación cuando sólo se envía tolueno al biorreactor, días.

^d Resultados de reaclimatación cuando sólo se envía benceno al biorreactor, días

Tabla 1. Tiempos de reaclimatación del biorreactor después de períodos sin uso (Ref.4)

Si bien los resultados de esta investigación son pobres, suministran suficiente información como para determinar tendencias útiles. Por ejemplo, el tiempo de reaclimatación durante las pruebas con tolueno es más del doble entre 1.67 días y 3.73 días de pasadas de pruebas sin uso (0.46 días frente a 1.0 día). El tiempo necesario para reaclimatarse después de un período sin uso de dos semanas de duración (14 días) es de cuatro veces y media mayor que aquél para reaclimatarse después de un período de 3.73 días sin uso (1.80 días frente a 0.39 días). Si bien demora más reaclimatarse de un período de 2 semanas sin uso, dicho tiempo aún es menor que el tiempo original de aclimatación (1.80 días frente a 4 días).

Los datos sobre los efectos de la humedad son incluso más pobres. Sólo se dan dos ejemplos directos de los efectos de la humedad: un período de 3.73 días probado con y sin humidificación usando tolueno y benceno. En el tiempo humidificado en estado de inactividad, el lecho se reaclimató al tolueno en 0.39 días. En la prueba sin humidificación, demoró 1 día (61 por ciento más tiempo). No hubo diferencia en los períodos de reaclimatación durante ensayos con benceno con y sin humedad. Ambos demoraron 0.21 días.

¿Cómo se compara esta investigación con otras investigaciones de reaclimatación? Según los autores: "Por lo tanto, otras investigaciones han encontrado períodos de aclimatación tanto más cortos como más largos que aquellos encontrados en esta investigación. Es difícil hacer comparaciones entre los períodos de aclimatación, ya que los diferentes estudios emplearon varios tipos diferentes de sustancias químicas, tipos de medios [de empaque del lecho] y condiciones de operación." (Ref.4) En otras palabras, probablemente sea necesaria una planta piloto para determinar los períodos de aclimatación y reaclimatación, así como otros parámetros de operación para cada corriente de emisión y combinación de medios del lecho.

PROCESOS DEL BIORREACTOR

A partir del diseño básico del biofiltro, algunos procesos nuevos han evolucionado para convertirse en ambiental y comercialmente viables. Estos nuevos procesos se dirigen a situaciones que no se han afrontado de manera adecuada en el diseño básico de un biofiltro, tales como la gran cantidad de espacio requerido, los ambientes ácidos (control del pH), los

contaminantes que requieren tiempos de asimilación más prolongados y la alimentación de los nutrientes.

Biofiltros

En el apartado "Descripción general," encontrará una breve discusión del diseño y operación básicos de los biofiltros. Los biofiltros son ideales para tratar las emisiones que tienen bajas concentraciones de contaminantes y alto volumen de gas, una situación que los métodos tradicionales de tratamiento no logran superar. A continuación, se muestran otras ventajas y desventajas.

Ventajas de los biofiltros:

- Los costos de instalación son bajos. La mayoría de los biofiltros se construyen a partir de materiales comunes, disponibles a nivel local, tales como madera, fibra de vidrio y tuberías plásticas. Se pueden ensamblar por carpinteros, plomeros y excavadoras.
- Según la cantidad de pretratamiento que requieran las emisiones, los costos operativos por lo general son bajos. Estos costos constan de electricidad para operar el soplador primario y la bomba de humidificación, mano de obra a tiempo parcial para verificar el proceso, y pequeñas cantidades de macronutrientes.
- Los biofiltros tienen altos niveles de DRE^f para ciertos compuestos tales como aldehídos, ácidos orgánicos, óxido nitroso, dióxido de azufre y sulfuro de hidrógeno.

Desventajas de los biofiltros:

- Requerimiento grande de terreno para un diseño tradicional.
- No hay un flujo interno continuo de líquido en el cual es posible ajustar el pH del lecho o agregar nutrientes.
- El diseño tradicional no tiene una tapa cubierta, lo que dificulta la capacidad de obtención de muestras representativas de emisiones del escape y determinar los niveles de DRE .
- Los medios naturales del lecho que se utilizan en los biofiltros deben reemplazarse cada 2 a 5 años. El reemplazo del lecho puede demorar de 2 a 6 semanas, dependiendo del tamaño del lecho.

Con el correr del tiempo, se han desarrollado algunas modificaciones para superar algunas de las deficiencias específicas en el diseño tradicional de los biofiltros. Para aumentar el tiempo de contacto con los microbios, algunas instalaciones reciclan una porción del escape a través del biorreactor. Esto se hace agregando una tapa y un respiradero al biofiltro. Se retira un chorro desde el respiradero, el cual se recicla nuevamente hacia la entrada del soplador primario. Vea la Figura 2. Asimismo, si hay terreno disponible, se pueden agregar módulos de biofiltro horizontalmente, en serie. Esta configuración se muestra en la Figura 3.

^f Eficiencias de destrucción/ eliminación de contaminantes

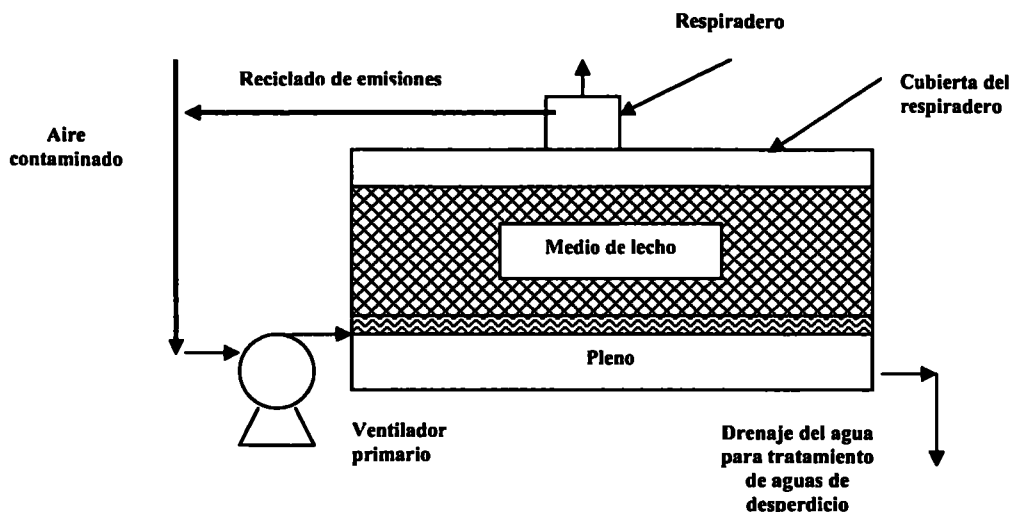


Figura 2. Biofiltro con reciclado de emisiones

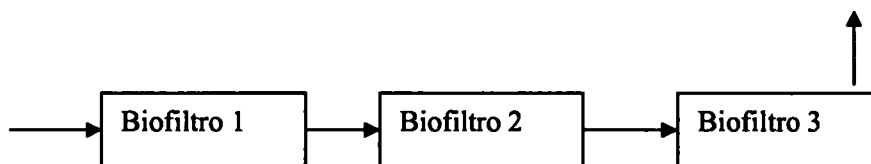


Figura 3. Biofiltros en serie, horizontalmente

Para reducir el requisito de cantidad de terreno, algunos operadores han apilado los módulos del biofiltro verticalmente. Tal como se menciona en el apartado "Factores que afectan el rendimiento," más arriba, algunos operadores han instalado mangueras de remojo en los medios del lecho para controlar el pH y agregar nutrientes. Algunos han agregado cubiertas selladas para evitar el ingreso de la lluvia y mantener adentro el calor. Esta cubierta también suministra un respiradero desde el cual es posible obtener una muestra representativa del escape, a fin de calcular un valor más exacto del control de eficiencia de remoción.

Una de las primeras modificaciones fue instalar el biofiltro en el suelo, tal como se indica en las Figuras 4 y 5. Esto puede hacerse de la siguiente manera: excavando un hoyo en el suelo del tamaño del biofiltro, colocando un revestimiento de grava gruesa de varias pulgadas de espesor en el fondo, instalando un sistema de tuberías de distribución sobre cascajo, cubriendo el sistema de tuberías con algunas pulgadas adicionales de cascajo y cubriendo el cascajo con varios pies de medios de empaque.

Características de diseño del biofiltro: Hace algunos años, Allen Boyette (Ref. 6) hizo investigaciones y redactó un reporte sobre las instalaciones de biofiltros existentes, presentando características de diseño e información de costos⁸. Lamentablemente, la información es para biofiltros destinados al control. Sin embargo, brinda información de costo e información limitada sobre los compuestos con *Total Reduced Sulfur (TRS)*, azufre total reducido, y una

⁸ El informe no tiene fecha, pero parece haber sido escrito alrededor del año 2000

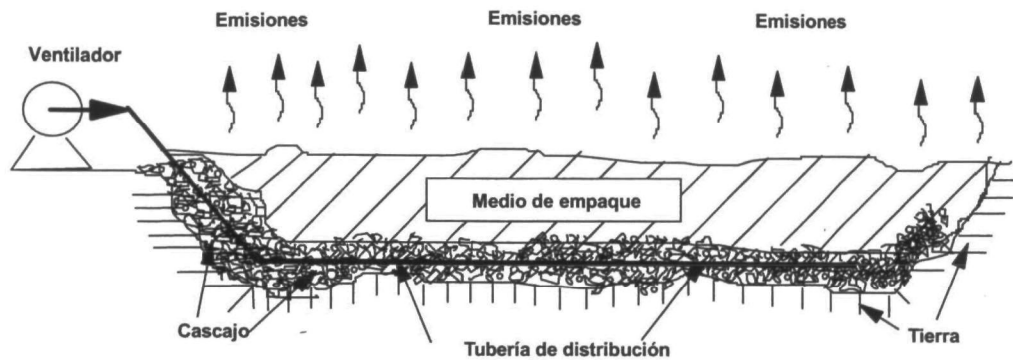


Figura 4. Biofiltro en el suelo



Figura 5. Fotografía de cuatro biofiltros que se están instalando en Arlington, TX en la planta del sistema efluentes de central regional

pruebas sobre el *Volatile Organic Compounds* (VOC, compuestos orgánicos volátiles). Vea la Tabla 2. A partir de la información en la Tabla 2, se calcularon los costos de capital para los biorreactores por volumen unitario de emisiones en *cubic feet per minute* (CFM); vea la Tabla 3.

Las cifras de costos resultantes son muy variables, pero el costo por volumen unitario parece disminuir a medida que aumenta el flujo de aire, tal como se esperaría. El costo para los tres biofiltros con capacidades de 50,000 CFM y más, promedian sólo \$4.24 por pie cúbico por minuto. Esto probablemente se debe a las economías de escala. El señor Boyette no incluye los costos de instalación de conductos en sus cifras de costos. En sus propias palabras, "El sistema de recolección del gas oloroso para cada caso no se incluye en el costo de capital, ya que los

Instalación ^a	Fuente de olor	Tasa de flujo, CFM	Carga del filtro, CFM/pies ²	Área, pies ²	Profundidad, pies	Volumen, pies ³	Tiempo de residencia, segundos	Mezcla de medios	Eficiencia de eliminación, %	Costo ^b , \$ K
CMCMUA, NJ	Abono	2,400	4	600	4	2,400	60	CYW ^c , WC ^d	NT ^e	\$49.8
CCCSD, CA	WWTP	3,500	5	700	4	2,800	48	CYW ^c , WC ^d	NT ^e	\$129
DMUA, IA	Abono	210,000	5	42,000	4	168,000	48	CYW ^c , WC ^d	86 Olor	\$495.5
EHMSW, NY	Abono	50,000	5	10,000	3	30,000	36	CYW ^c , WC ^d	NT ^e	\$135.4
EWWTWP, NY	WWPT	15,000	2.67	5,620	4	22,480	90	No se conoce	NT ^e	Nar
HRRSA, VA	Abono	3,150	4	790	4	3,160	48	Biosólidos, WC	NT ^e	\$58.0
HWQD, MA	Abono	15,000	3.5 a 5	3,600	3	10,800	40-60	CYW ^c , WC ^d	94 Olor 99 TRS	NA ^f
RWSA, VA	Aguas cloacales	2,825	5	565	4	2,260	48	CYW ^c , WC ^d	76 Olor	\$14.3
SBC, TN	Abono	80,000	4.5	19,800	2.5 a 3	54,450	30-45	NA ^f	91 Olor 93 VOC	NA ^f
UNISYN, HI	Alimento Desechos	2,500	4	625.3	.5	2,188	42	CYW ^c , WC ^d	82 Olor 99 TRS	\$11.4
WLSSD, MN	WWPT	50,000	4.2	11,800	4	47,200	57	CYW ^c , WC ^d	NA ^f	\$387.0

^a CMCMUS = Cape May County Municipal Utilities Authority, autoridad de servicios públicos municipales del condado de Cape May, Cape May, NJ

CCCSD = Central Contra Costa Sanitary District, distrito sanitario de Contra Costa central, Martinez, CA

DMUA = Davenport Municipal Utilities Authority, autoridad de servicios públicos municipales de Davenport, Davenport, IA

EHMSW = East Hampton Municipal Solid Waste, desechos sólidos municipales de East Hampton, East Hampton, NY

EIWWTP = Everett Waste Water Treatment Plant, planta de tratamiento de aguas residuales de Everett, Everett, WA,

HRRSA = Harrisburg/Rockingham Regional Sewer Authority, autoridad cloacal regional de Harrisburg/Rockingham, Mt Crawford, VA

HWQD = Hoosac Water Quality District, distrito de calidad del agua de Hoosac, Hoosac, MA

RWSA = Rivanna Water and Sewer Authority, autoridad de aguas y cloacas de Rivanna, Charlottesville, VA

SBC = Sevierville Bedminster Corp., Sevierville, TN (MSW)

UNISYN = UNISYN Corporation, Waimanilo, HI (una empresa trata los desechos alimenticios)

WLSSD = Western Lake Superior Sanitary District, distrito sanitario de la parte occidental del lago Superior, Duluth, MN

^b Costo total de diseño, construcción y puesta en marcha. No incluye la instalación de conductos

^c Abono proveniente de desechos de parques y jardines

^d Astillas de madera

^e No se han probado

^f Información no disponible

Tabla 2. Resumen de características de diseño de biofiltros existentes (Ref. 6)

Ubicación de la instalación	Flujo de aire, CFM	Costo ^a , \$	Costo por tasa de flujo de aire, \$/CFM
Wiamanillo, HI	2,500	\$11,400	\$4.56
Charlottesville, VA	2,825	\$14,300	\$5.06
Cape May, NJ	2,400	\$49,800	\$20.75
Mt. Crawford, VA	3,150	\$58,000	\$18.41
Martinez, CA	3,500	\$129,700	\$37.06
E. Hampton, NY	50,000	\$135,400	\$2.71
Duluth, MN	50,000	\$387,000	\$7.74
Davenport, IA	210,000	\$494,500	\$2.35

^a El costo no incluye la instalación de conductos. Sí incluye los costos de ingeniería, construcción y puesta en marcha.

Tabla 3. Costo del biofiltro por unidad de volumen de flujo de aire

sistemas de recolección varían desde simples sistemas de conductos a sistemas elaborados de conductos y controles. La inclusión del sistema de recolección puede aumentar de manera significativa el costo de instalación de un sistema de control de los olores, y sería requerida con cualquier [otra] tecnología de control de olores seleccionada."(Ref.2)

Tal como se indicó anteriormente en esta sección, existen muchas variaciones al diseño del biofiltro que van desde equipos y controles muy elaborados, a un simple hoyo en el suelo. Otros factores que afectan los costos son los costos de la mano de obra en el área y la situación geopolítica.

FILTRO BIOPERCOLADOR

Tal como se menciona en la sección "Biofiltros," el diseño básico de un biofiltro dificulta la capacidad de controlar el pH en el empaque. Se forma ácido por la destrucción biológica de muchos contaminantes, y la acumulación de ácidos crea un problema serio para los operadores. Muchos de los primeros biofiltros se utilizaron para eliminar olores de emisiones sucias provenientes de las instalaciones de tratamiento de aguas residuales (cloacas). Estas emisiones con frecuencia contienen compuestos de azufre que producen ácido al degradarse. Debido al efecto perjudicial del ácido en los microbios, los operadores comenzaron a experimentar con procesos para controlar el pH que habían usado y comprendido. Uno de los procesos con los cuales experimentaron fue el filtro percolador. Los filtros percoladores se han usado por muchos años y representan un tratamiento eficaz para las aguas residuales.

¿Qué es un filtro biopercolador? Probablemente sea mejor responder primero a la pregunta "¿Qué es un filtro percolador?", y luego describir las modificaciones que se hicieron para crear el filtro biopercolador. Un filtro percolador es un proceso de tratamiento de aguas residuales que por lo general consta de un tanque vertical redondo que contiene un bastidor de soporte y se llena con agregados, cerámica o medios plásticos hasta una altura de 3 a 15 pies. En el centro del tanque hay una tubería vertical que tiene una conexión giratoria en el extremo superior. Se conecta un brazo de aspersión a la conexión giratoria, el cual cuenta con boquillas de aspersión instaladas todo a lo largo de su trayectoria. Las boquillas de aspersión están

anguladas de madera ligeramente descentrada para proporcionar la fuerza necesaria para girar el brazo de aspersión alrededor de la parte superior del filtro percolador. Se utiliza una bomba de recirculación para bombear el líquido desde el depósito en el fondo hasta las boquillas de aspersión. El nivel de líquido en el sumidero se mantiene mediante un sistema automático de reposición de efluente. Se forma una biopelícula en la superficie de empaque. Se trata de una masa biológicamente activa que elimina los contaminantes del efluente y los microbios que los descomponen. Vea la Figura 6.

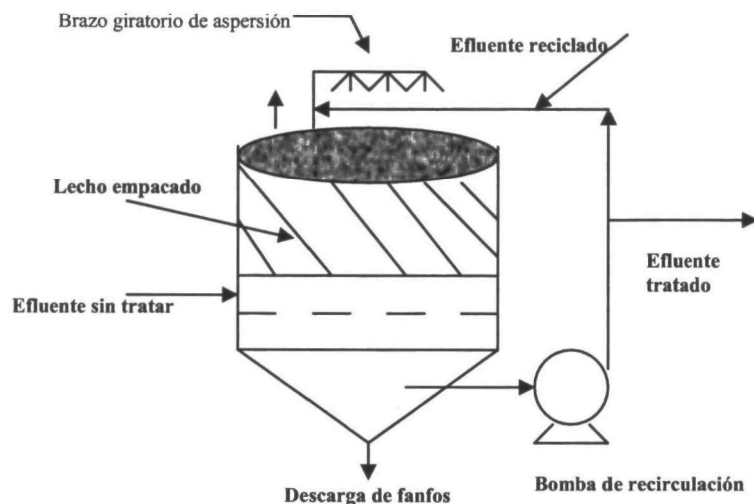


Figura 6. Filtro percolador

El filtro biopercolador es muy similar al filtro percolador. Sin embargo, los contaminantes se contienen en una fase de aire (emisiones), y los contaminantes deben disolverse en ellas fase líquida para que estén disponibles para los microbios. A media que la fase de aire atraviesa el empaque, los contaminantes se absorben desde el aire hacia la fase líquida para lograr un máximo contacto con la biomasa. Ésta es la diferencia con el filtro percolador, porque los contaminantes que ingresan al sistema ya se encuentran en la fase líquida (efluente) en el filtro percolador. Se agrega agua al depósito para compensar el agua que se ha evaporado. Los biofangos acumulados se eliminan y desechan periódicamente del depósito. Vea la Figura 7.

Las emisiones pueden encaminarse a través del filtro biopercolador en cocrriente o en contracorriente al flujo de efluente. Debido al flujo continuo de una fase líquida, es una cuestión sencilla neutralizar automáticamente la acumulación de ácidos.

El uso de anillos de empaque cerámicos o plásticos logran un espacio vacío de hasta el 95 por ciento, que reduce en gran medida la caída de presión a través del empaque. Esto significa que 15 pies de empaque plástico en un filtro biopercolador tendrá aproximadamente la misma caída de presión que 3 pies de empaque natural en un biofiltro. En otras palabras, los 15 pies de empaque plástico son equivalentes a un biofiltro de 5 etapas. Las características típicas de los biofiltros encontrados en los Estados Unidos se muestran en la Tabla 4 (Ref. 7) . Las características de diseño de cuatro filtros biopercoladores existentes se muestran en la Tabla 5

(Ref. 6). El costo de tres de estos filtros biopercoladores por volumen unitario de flujo de aire se presenta en la Tabla 6.

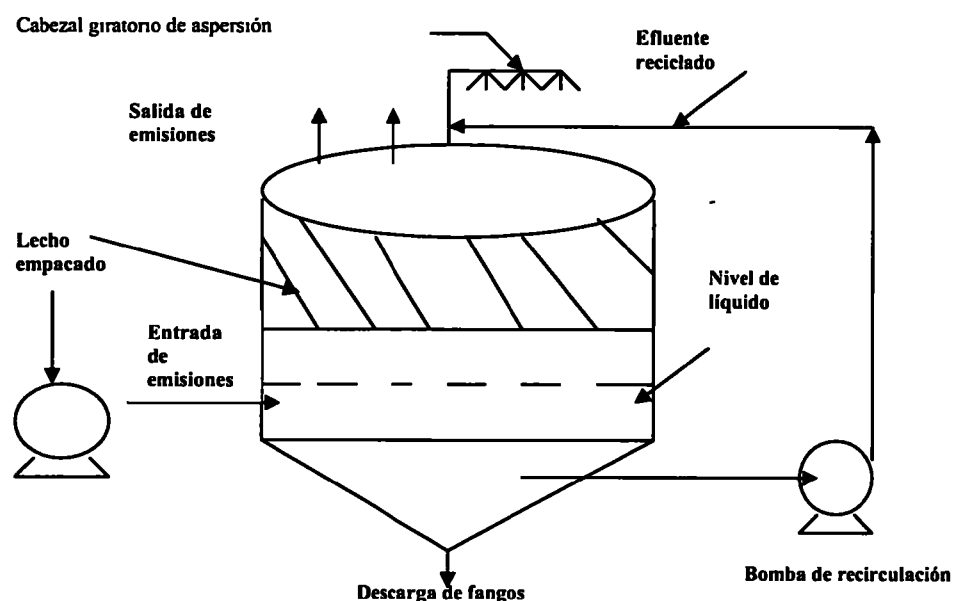


Figura 7. Filtro biopercolador

Altura de empaque del lecho, pies	3 a 6
Área transversal del empaque, pies ²	10 a 32,000
Tasa de flujo de emisiones, CFM	600 a 600,000
Volumen vacío del empaque, % ^a	90 a 95
Tiempo de retención de gas del lecho vacío, segundos ^b	2 a 60
Caída de presión a través del lecho, pulgadas H ₂ O	0.36 a 2
pH de la fase líquida reciclada	
Al tratar VOC	~ 7 pH
Al tratar H ₂ S	1 a 2 pH
Concentraciones de VOC, granos pies ³	4.57 E-3 a 45.7
Eficiencia de eliminación, %	60 a 99.9

^a Usando anillos de empaque, volcados de manera aleatoria o mediante un empaque estructurado

^b El tiempo de retención de gas en el lecho vacío (EBGR) se define como el volumen del lecho empacado/tasa de flujo de emisiones

Tabla 4. Características generales de los filtros biopercoladores (Ref. 7)

Instalación ^a	Operación	Empaque	Dimensión del filtro		Flujo, CFM	EBRT, segundos	ΔP en H ₂ O	Temp. del lecho, °F	Costo, \$ K	Costo op., \$/MMCFM	Eficiencia, %
			Diámetro	Altura							
Hyperion	WWTP	Apilado	5 pies	11 pies	380	21	0.32	94	\$175	\$0.23	98
Grupo	Resinas	Apilado	12 pies	38 pies	26 K	10	1.0	92	\$525	\$0.68	85-99
Reemtsma	Tabaco	Espuma	NA	NA	100 K	11	6.0	104	\$3,000	\$0.23	90
US Navy	Respiraderos de combustible	Aleatorio	10 pies	10 pies	1,750	37	5.0	80	NA		\$0.72

^aHypeiona = *Hyperion Wastewater Treatment Plant*, planta de tratamiento de aguas residuales Hyperion, Los Angeles, CA

Grupo = Grupo Cydsa, Monterrey, México (celofán)

Reemtsma = Berlín, Alemania (producción de cigarrillos)

US Navy, North Island, San Diego, CA

Tabla 5. Características de diseño para filtros biopercoladores existentes (Ref. 7)

Instalación	Tasa de flujo, CFM	Costo, \$	\$/CFM ^a
Hyperion WWTP	380	\$175 K	\$460.00
Grupo	26,000	\$525 K	\$20.20
Reemtsma	100,000	\$ 3,000 K	\$30.00

^aNOTA. El costo por volumen unitario del flujo de aire (\$/CFM) se calcula a partir de datos de la Tabla 5.

Tabla 6. Costo del filtro biopercolador por unidad de volumen de flujo de aire

Los resultados de costos en la Tabla 6 requieren una explicación. La unidad Hyperion fue diseñada, construida y operada por ingenieros químicos de la Universidad de California en Riverside. Estaba destinada a ser usada como dispositivo de investigación multiuso y fue construida como remolque móvil. En consecuencia, se incorporó a esta aplicación mucha más flexibilidad e instrumentación de lo que normalmente sería necesaria. Como resultado de ello, en esta comparación no se utilizó el costo por tasa de flujo volumétrico para esta instalación.

Los costos por tasas de flujo para las dos aplicaciones restantes no son muy diferentes entre sí, y tienen un promedio de \$25.10/CFM. Esto es casi seis veces tan alto como \$4.25/CFM, el costo promedio de los tres biofiltros más grandes. Esto es de esperarse, ya que el equipo de filtro percolador tiene un diseño más cercano a los equipos de proceso industrial que los biofiltros tradicionales.

BIODEPURADOR

Tal como el filtro biopercolador es una mejora del biofiltro, el biodepurador es una mejora del filtro biopercolador. El biodepurador trata de resolver dos problemas del filtro biopercolador: 1. mejorar la absorción de contaminantes en el líquido, y 2. ampliar el tiempo que tienen los microbios de consumir los contaminantes. Esto se logra de dos maneras: se inunda el empaque de la torre con una fase líquida y se recoge el efluente de descarga del biodepurador en un tanque de almacenamiento (sumidero) antes de volver a reciclarlo al biodepurador. Vea la Figura 8.

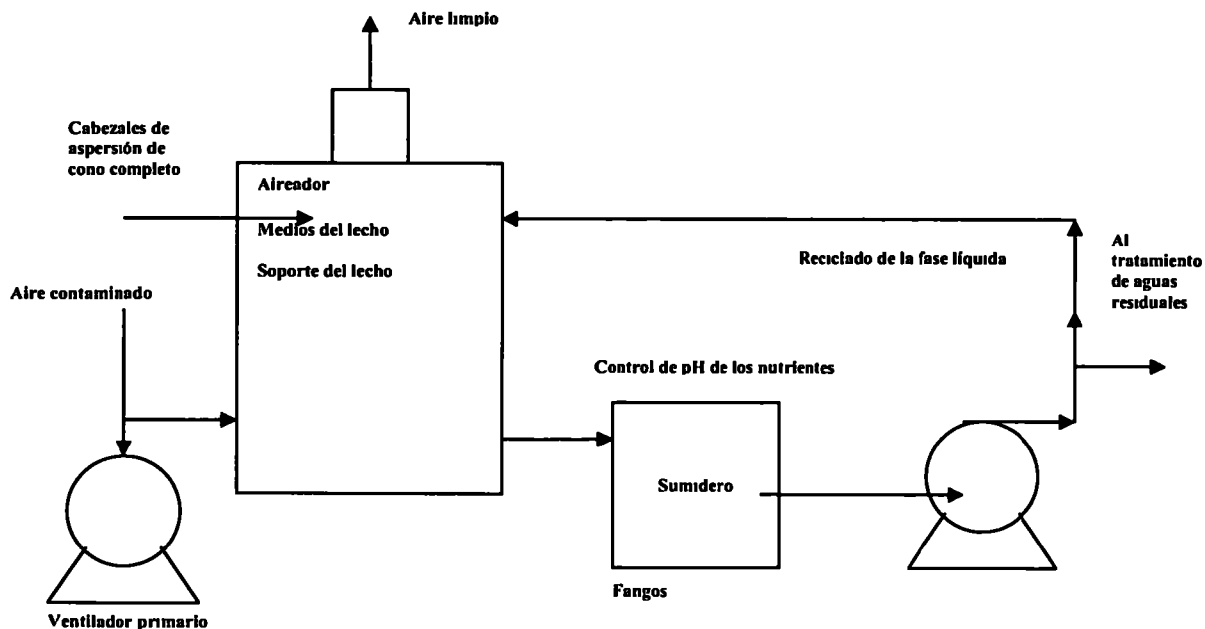


Figura 8. Biodepurador

La inundación del lecho aumenta la capacidad de la fase líquida de absorber contaminantes porque a medida que la fase gaseosa (emisiones) choca con los medios del lecho, forma minúsculas burbujas que aumentan grandemente el área superficial de la interfaz entre las fases gaseosa y líquida. El aumento del área de la interfaz mejora la capacidad de la fase líquida de absorber los contaminantes.

El sumidero sirve como depósito para la fase líquida y permite un tiempo de reacción adicional para que los microbios consuman los contaminantes. Los tiempos de reacción pueden aumentarse a una hora o más, dependiendo de la tasa de recirculación de la fase líquida y del tamaño del sumidero. Esto aumenta el tiempo disponible para que los microbios se adhieran a, y destruyan, los contaminantes. A continuación, se presentan más ventajas y desventajas de los biodepuradores.

Ventajas de los biodepuradores:

- No es necesario humidificar las emisiones antes de tratarlas. Esto podría ahorrar el costo de instalar un proceso de humidificación.
- El biodepurador tiene una base más pequeña que los demás biorreactores. Ésta es una consideración importante en las instalaciones congestionadas con limitaciones del espacio disponible.
- Dado que puede automatizarse el control del pH y la alimentación de nutrientes, requiere menos atención que otros tipos de biorreactores.
- Este proceso resulta ideal para las emisiones que producen ácidos en el momento del tratamiento.
- El biodepurador puede tratar emisiones que contienen materia particulada.

Desventajas de los biodepuradores:

- Es considerablemente más costoso de instalar que otros tipos de biorreactores. Tiene un depurador químico como corazón del proceso, y se asemeja más a los equipos de procesamiento químico que otros tipos de biorreactores.
- Una sobrealimentación puede causar un exceso de crecimiento de la biomasa, que puede taponar el biodepurador.
- El costo operativo puede ser más alto que el de los procesos de otros tipos de biorreactores.
- Necesita costosos y complejos sistemas de alimentación y neutralización.
- Para controlar el crecimiento de la biomasa, se deberá realizar un inventario y manipular a los compuestos tóxicos y peligrosos.

Las características operativas y los datos de costos fueron escasos en *Internet*. No obstante ello, se encontró algo de información para tres instalaciones. Esta información se presenta más abajo, en la Tabla 7.

Lamentablemente, no existe información suficiente en el sitio *web* de *Roloflex* para determinar por qué el costo de instalación de su biodepurador es de un orden de magnitud menor, en base a la tasa de flujo, que las dos instalaciones de biodepurador de la *Trinity River Authority (TRA)*, autoridad del río Trinity. El sitio *web* de *TRA* indicó que estimaron el

	<i>Roloflex, Reino Unido (Ref. 10)</i>	<i>Trinity River Authority, autoridad del río Trinity (Ref. 11)</i>	
Servicio	Escape del secador, solventes para tintas de impresión	1 etapa, WWTP	3 etapas WWTP
Tasa de flujo volumétrico	8,541 CFM	300 CFM	1,200 CFM
Costo de capital (US \$)	\$284,591	\$50,000	\$275,000
Concentración en la entrada	500 mg/m ³ , C	~200 ppm, H ₂ S	~400 ppm, H ₂ S
Concentración en la salida	50-100 mg/m ³ , C	1 ppm, H ₂ S	No detectado
Costo/Tasa de flujo (US \$)	\$33/CFM	\$170/CFM -	\$230/CFM

Tabla 7. Características de diseño de los biodepuradores

costo de un biodepurador no patentado, de diseño casero, usando piedras de lava como medios de empaque. Indican que las cotizaciones del proveedor fueron comparables con su costo estimativo, y por ello seleccionaron las cotizaciones de dicho proveedor. *TRA* parece satisfecho con el rendimiento de sus dos biodepuradores.

OTRAS TECNOLOGÍAS DEL BIORREACTOR

Durante el curso de este estudio, se identificaron otras tecnologías de biorreacción. Dado que no se encontró referencia alguna a aplicaciones comerciales de dichas tecnologías, en este informe no se proporciona información detallada sobre estos procesos. Estas tecnologías comprenden la aplicación de una biomembrana y el uso de biorreactores de carbón activado autolimpiantes.

La biomembrana utiliza membranas para concentrar los contaminantes y como estructura de soporte para la formación de una biopelícula. Sin embargo, los problemas inherentes de la tecnología de membranas (bajos flujos y alta caída de presión) parecen haber inhibido el desarrollo de la utilización comercial de esta tecnología.

El bioadsorbedor autolimpiante (formalmente, el biorreactor o filtro giratorio) es un cilindro horizontal compuesto de granulated active carbon (*GAC*) (un lecho de carbón activo granulado) montado sobre un eje con soportes en ambos extremos. Una tercera parte del lecho está sumergida en una batea con agua. Los microbios se embeben en el *GAC* y el lecho gira a través del baño de agua. El lecho está encerrado y las emisiones ingresan desde un extremo y salen por el otro. En teoría, el *GAC* adsorbe los contaminantes de la corriente de emisiones y los microbios consumen los contaminantes a medida que gira el lecho a través del baño de agua y la corriente de emisión. No es claro por qué esta tecnología no ha resultado comercialmente viable.

OPCIONES DE CONTROL Y COMPARACIONES DE COSTOS

Los costos de instalación y operación de los equipos de control de emisiones son muy importantes para la instalación afectada. De hecho, un número de operaciones marginales declararon bancarrota dado que los costos de los controles los hacían poco rentables. Para evitar

que esto suceda, una instalación debe analizar todas sus opciones para determinar cuáles tecnologías de proceso son viables y cuánto cuestan.

Lamentablemente, es difícil obtener información consistente, fiable y precisa de los costos de construcción y operación para las instalaciones existentes de biorreacción. Existen varias razones por ello. Una razón es que la biorreacción es una tecnología emergente, y no hay tantas instalaciones en uso por las industrias de proceso. Otra razón es que las instalaciones que están usando los biorreactores tienen reticencia de publicar información de costos de instalación y operación, por motivos competitivos.

Las estimaciones para los procesos de biorreacción se basan en diseños muy básicos. No incluyen ningún tipo de pretratamiento tal como la humidificación o la eliminación de la materia particulada (*PM*). Es posible que se requieran estos procesos adicionales. Las estimaciones también asumen que el costo de los conductos y la instrumentación fueron simples y mínimas.

Las estimaciones para los procesos que utilizan incineración (procesos térmicos y catalíticos) fueron obtenidas usando el programa *Air Compliance Advisor*, Versión 7.0, de la *EPA* de EE.UU. Estas estimaciones, bajo las mejores condiciones, son exactas en un más o menos treinta por ciento. Lamentablemente, la situación presentada aquí está fuera del rango de la ecuación (es demasiado baja) para la tasa de flujo de las emisiones. Por lo tanto, los resultados obtenidos podrían ser incluso menos fiables. Aquí se intentó generar estimaciones del orden de magnitud de biorreactores y tecnologías tradicionales para propósitos de comparación.

Para las comparaciones de cabezal a cabezal, se utilizó la técnica de la planta modelo. Se utilizó una planta y corriente de emisión hipotéticas para diseñar y estimar los costos de diversas tecnologías viables. Hace aproximadamente una década, la *EPA* emitió un reporte de *alternative control technology (ACT)*, tecnología de control alternativo, en la industria de la panadería (Ref. 11). Dicho reporte incluyó a nueve panaderías modelo, con capacidades de 5,400 a 19,000 toneladas de pan por año. Se decidió utilizar una panadería modelo que se encontraba aproximadamente en el centro de este rango, de 14,000 toneladas por año.

Se emplearon los siguientes criterios para las especificaciones de la panadería modelo:

- El horno de panadería consume el equivalente de 5 millones de *BTU* de gas natural por hora.
- El horno de panadería opera 24 horas del día, 7 días de la semana, y 8,000 horas por año.
- La panadería sólo fabrica pan blanco usando el proceso de masa esponjosa.
- El horno es por alimentación directa con gas natural y sólo tiene una chimenea.
- Las emisiones contienen un 10 por ciento de humedad, 2,000 partes por millón, en base de volumen (*ppmv*) de etanol y 20 *ppmv* de acetaldehído.
- Las emisiones de un horno de panadería tienen un promedio de 1,579 pies cúbicos reales por minuto (*ACFM*), y tienen una temperatura de aproximadamente 375 °F.

Un reciente *state implementation plan (SIP)*, plan de implementación del estado, ahora requiere que la panadería elimine y destruya el 98 por ciento de los contaminantes en sus emisiones. Para determinar cuáles tecnologías de control de las emisiones son viables para

controlar las emisiones provenientes de esta panadería, es necesario revisar las tecnologías disponibles. Las técnicas de control de las emisiones pueden dividirse en dos grupos: tecnologías con combustión (incineración) y sin combustión.

Dispositivos de control con combustión

Esta categoría requiere que el calor queme las moléculas de *VOC* en presencia de oxígeno. El escape de un horno de panadería contiene material orgánico volátil insuficiente para soportar la combustión. En esta situación, resulta necesario suministrar combustible adicional (por lo general gas natural) para traer la temperatura de las emisiones hasta el nivel en que los contaminantes entrarán en combustión. La *EPA* ha encontrado que las emisiones expuestas a 1,600 °F durante por lo menos 0.75 segundos destruirán por lo menos el 98 por ciento de la mayoría del *VOC*. Las tecnologías de combustión incluyen la oxidación térmica, la oxidación regenerativa, la oxidación recuperativa, la oxidación catalítica y los destellos.

Oxidación térmica: En esta tecnología, las emisiones se mezclan en la llama del fuego combustible suplementario y se alimentan en un horno con revestimiento refractario que contiene suficiente volumen como para permitir que la mezcla de gas resida durante al menos 0.75 segundos antes de liberarse como escape. Esta tecnología funciona muy bien, y este tipo de incinerador es simple de operar. El problema con esta tecnología es que desperdicia grandes cantidades de energía. Los gases del escape están a 1,600 °F y se podrían usar para precalentar las emisiones antes de ingresar al horno. Dado que la oxidación térmica es una opción tan derrochadora, no se la considerará en este análisis.

Oxidación regenerativa: Esta tecnología utiliza dos recipientes para capturar parte del calor de desecho desde el oxidante térmico. Cada recipiente se llena con un empaque cerámico, que se caliente en el primer recipiente con gases del escape provenientes del oxidante térmico. Cuando el empaque en el primer recipiente está caliente, los gases del escape pasan al segundo recipiente y las emisiones del horno de panadería se encaminan a través del primer recipiente para ser precalentados por el calor residual en el empaque cerámico. Vea la Figura 9. Es posible recuperar tanto como el 70 por ciento del calor desechado, lo cual reduce el costo del combustible en un 70 por ciento (Ref. 12).

En el Modo A, las emisiones provenientes del horno de panadería se dirigen a través del Recipiente Uno y son calentadas por el calor residual contenido en el empaque cerámico. Los gases del escape desde el oxidante térmico se dirigen hacia el Recipiente Dos para calentar su empaque.

En un momento predeterminado, los flujos se cambian al Modo B. En secuencia, el escape del Horno comienza a calentar el empaque en el Recipiente Uno, y el calor residual en el Recipiente Dos calienta las emisiones del Horno. En ambos Modos, se quema gas natural adicional en el horno de oxidación térmica para mantener su temperatura por encima de 1,600 °F. La Oxidación Térmica Regenerativa es una opción viable para el tratamiento de las emisiones del horno de panadería.

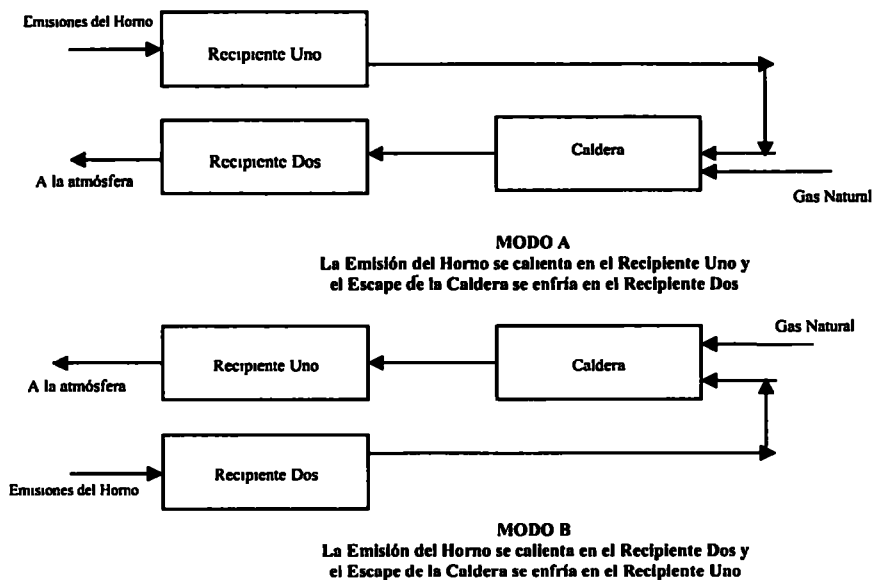


Figure 9. Modos de operación del oxidante térmico regenerativo

Oxidante térmico recuperativo: Esta tecnología es algo similar a un Oxidante Térmico Regenerativo. Ambos recuperan y utilizan el calor de desecho, pero de una manera diferente. En un Oxidante Térmico Recuperativo, las emisiones desde el horno fluyen a través del lado de los tubos de un intercambiador térmicos de casco y tubos, y el escape desde el oxidante térmico se encamina a través del lado del casco. El calor se transporta desde el escape del oxidante caliente hacia las emisiones del horno más frías. Vea la Figura 10.

El Oxidante Térmico Recuperativo es una opción viable para tratar el escape de un horno de panadería.

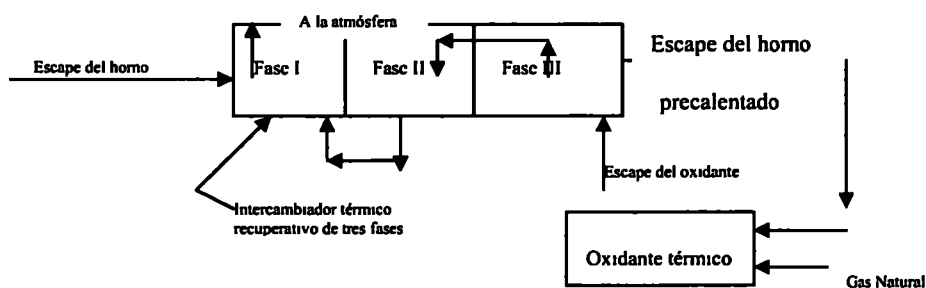


Figura 10. Oxidante térmico recuperativo de tres fases

Oxidación catalítica: Esta tecnología utiliza metales que actúan como un catalizador para facilitar la reacción entre el oxígeno y los contaminantes de modo que la reacción tenga lugar a una temperatura mucho menos que la temperatura de oxidación térmica. Típicamente, las reacciones asistidas por catalizador tienen lugar en el rango de 600 a 1,200 °F, en lugar de los 1,600 °F requeridos por la oxidación térmica. Como resultado de ello, se pueden obtener ahorros significativos de combustible usando un dispositivo de control asistido por catalizador. Vea la Figura 11.

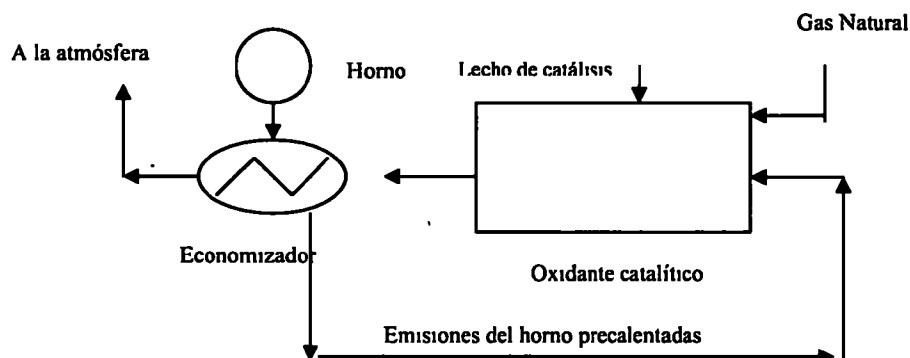


Figura 11. Oxidante catalítico

Las desventajas de utilizar un catalizador incluyen un costo de capital mayor. Un catalizador de metal precioso puede costar tanto como \$600 a \$800 por pie cúbico. Además, el uso de un catalizador requiere una corriente de emisiones extremadamente limpias que tengan poca cantidad de materia particulada. La materia particulada puede recubrir las superficies del catalizador, reduciendo su eficacia. La oxidación catalítica es una opción viable para tratar las emisiones del horno de panadería 23 y es la opción preferida de panaderías con controles en sus hornos (Ref. 11).

Dispositivos de control sin combustión

Adsorción de carbono: Esta tecnología utiliza recipientes llenos de carbón activado granulado (GAC) para adsorber contaminantes en sus superficies. En el caso de operaciones continuas, se requieren al menos dos recipientes. Cuando el GAC de la primera unidad se satura con contaminantes, se deben dirigir las emisiones hacia la segunda unidad mientras se regenera la primera unidad. La regeneración es el proceso de eliminar los contaminantes del GAC y restablecerlo a su capacidad. Por lo general, esto se hace con vapor y/o calor. Los contaminantes no se destruyen en el proceso de adsorción de carbono, simplemente se los transfiere a otra fase. El etanol, el contaminante principal en las emisiones de un horno de panadería, tiene una alta afinidad para el carbono, y es difícil de eliminar de los lechos de GAC. Debido a este problema, no se considera la adsorción de carbono como opción viable en esta situación.

Depuradores químicos: Esta tecnología utiliza una columna empacada con anillos cerámicos o plásticos, y se inunda con una fase líquida. Los contaminantes en las emisiones son absorbidos por el líquido, y el líquido contaminado requiere tratamiento adicional. Los contaminantes no son destruidos por el proceso de depuración, sino que pasan a la fase líquida, creando otro problema de contaminación. Como consecuencia de ello, la alternativa de depuración química no es una opción posible en esta situación.

Condensación: La condensación del etanol proveniente de las emisiones de una panadería requeriría serpentines enfriados refrigerados. Debido a las bajas temperaturas requeridas, también se condensarían el agua, la grasa y los aceites de estas emisiones. El agua se congelaría en los serpentines, y las grasas y aceites los ensuciarían, inhibiría la transferencia de calor y reduciría la eficacia del condensador. Este proceso también crearía volúmenes grandes de agua residual que requiere tratamiento adicional. Esta tecnología no se considera como una opción viable.

Cambios de proceso/formulación: Esta alternativa no se considera como una opción posible. Todos los productos con levadura modificada que disminuyen las emisiones de *VOC* producen productos que tienen un sabor inaceptable.

Biorreacción: Durante la última década, se han hecho adelantos significativos en diversos procesos biológicos. La mayoría de las instalaciones está evaluando diversos procesos de biorreacción como opciones viables a las tecnologías tradicionales. Debido a los grandes requerimientos de terreno, es posible que los biofiltros no sean una opción factible. Otras opciones que son potencialmente viables son los filtros biopercoladores y los biodepuradores.

Comparaciones de costos

Los costos de la destrucción térmica y catalítica de los contaminantes emitidos desde un horno de panadería se calcularon usando el programa *Air Compliance Advisor* de la *EPA*. Las suposiciones de costos y los datos de las corrientes de emisiones pueden encontrarse en el **Apéndice A**. Dichos costos se muestran en la Tabla 8, a continuación.

Proceso	Costo total de capital, \$	Costos anuales de servicios públicos ^a , \$	Otros costos directos ^b , \$	Costos indirectos ^c , \$	Costos anuales totales, \$
Recuperativo	\$227,375	\$6,300	\$25,700	\$24,760	\$52,300
Regenerativo	\$60,100	\$2,680	\$26,800	\$18,830	\$48,257
Catalítico	\$44,100	\$2,970	\$28,700	\$18,600	\$50,270

^a Los costos anuales de los servicios públicos incluyen los costos de electricidad y de gas natural.

^b Otros costos directos incluyen mano de obra, mantenimiento, supervisión y recuperación de capital

^c Los costos indirectos incluyen gastos fijos, seguros, impuestos y recuperación del capital

Tabla 8. Costo de control estimativo para procesos térmicos y catalíticos

Las estimaciones varían de \$48,257 para la tecnología regenerativa a \$52,300 para el proceso recuperativo. Los costos totales con frecuencia se expresan como costo por mil pies cúbicos tratados. Las emisiones anuales son de 758 millones de pies cúbicos por año, lo cual resulta en un costo de control de \$0.064 por pie cúbico al utilizar la tecnología regenerativa.

Los costos de control de biorreacción se estimaron a partir de valores encontrados en la literatura y en el *Internet* (Ref. 8). Los elementos de costo se muestran en la Tabla 9, a continuación.

Proceso	Costos totales, \$	Mano de obra ^b , \$	Nutrientes	Limpiezas del lecho ^c , \$	Costos indirectos ^d , \$	Costos anuales totales, \$
Biofiltro	\$8,560 ^a	\$1,780	\$640	\$1,605	\$1,200	\$5,225
Filtro biopercolador	\$42,800 ^e	\$1,780	\$640	\$1,605	\$6,000	\$10,025
Biodepurador	\$337,900 ^f	\$3,420	\$1,284	\$2,140	\$47,300	\$54,144

^a Estimación basada en \$5 por *CFM* y una tasa de flujo de 1,579 *CFM* + ajuste de *CPI* hasta enero de 2003

^b Incluye operaciones, mantenimiento y supervisión.

^c Dos por año.

^d Incluye gastos fijos, impuestos, seguros y recuperación del capital

^e \$25 por *CFM* + *CPI*.

^f \$200 por *CFM* + *CPI*.

Tabla 9. Costos de control al usar las biorreacciones

Las estimaciones de costos anuales totales para los procesos de biorreacción tienen un rango mucho más amplio que las estimaciones para los controles por incineración. La estimación anual de costos para los procesos por biorreacción varía de \$5,225 para un biofiltro a \$54,144 para un biodepurador. Los costos del biofiltro en dólares por *CFM* son de \$0.0069 por *CFM*, que es un orden de magnitud menos que la tecnología por incineración regenerativa. Los costos anuales totales del biodepurador son comparables con los costos anuales de los procesos de incineración. De este modo, no presenta ventaja financiera alguna frente a las tecnologías térmicas.

ASUNTOS SOBRE NORMAS

Se encontró muy poca información sobre cómo se regulan o permiten los biorreactores. Un productor de pintura que instaló un sistema de biorreactores en la Costa Oeste fue contactado para determinar cómo había obtenido los permisos para su instalación. El gerente ambiental de la planta dijo que la instalación recibió un permiso de tipo de planta piloto que les permitió experimentar a fin de determinar el *DRE* y las condiciones operativas óptimas. Posteriormente se determinó que el biorreactor inicial instalado tenía un tamaño deficiente y fue reemplazado con una unidad el treinta por ciento más grande. Están satisfechos con la nueva instalación, que según ellos fácilmente excede la garantía del proveedor del 75 por ciento de *DRE*. Se sienten confiados que con el tiempo podrían alcanzar un 85 a 90 por ciento de *DRE*. El gerente indicó

que siente que podrán ahora calificar fácilmente como un designación de "sintético menor" bajo los nuevos procedimientos de permisos de revisión de fuentes, en lugar de tener una designación de "fuente importante".

CONCLUSIONES

La *EPA* está planificando promulgar una nueva norma *MACT* para varios procesos orgánicos para fines del verano de 2003. Estas nuevas normativas someterán a más de 25 nuevas categorías de fuentes orgánicas a las normas *MACT*. Un número de operadores más pequeños ahora tendrán que cumplir con las nuevas normas de emisiones. Los ingenieros de plantas estarán considerando colectivamente lo que se debe hacer y cuánto costará cumplir con estas nuevas normas. Un sistema de biorreactores podría ser la mejor solución a este problema. Sin embargo, podría ser un camino arduo a seguir, y se deben hacer muchas investigaciones antes de tomarse las decisiones finales.

Al igual que muchas otras tecnologías de control, la biorreacción funciona en muchos casos, pero no en todos. La cuestión es saber cuándo funcionará y cuándo no. Esto requiere investigación, pruebas y consultas con peritos que tengan experiencia en la construcción y operación de biorreactores. La primera pregunta debiera ser: ¿La biorreacción es aplicable para mi corriente de emisiones? Si las emisiones son muy ácidas o muy básicas, deberán neutralizarse antes de ingresar a un biorreactor. Si no están en o cerca de una humedad relativa del 100 por ciento, deberán humidificarse si se piensa utilizar un biofiltro. Si la corriente de emisiones es demasiado caliente o fría, deberá enfriarse o calentarse. Si es demasiado sucia (con materia particulada), la corriente de emisión deberá limpiarse antes de ingresar a un biofiltro (los sólidos suspendidos no son un problema en el caso de filtros biopercoladores o biodepuradores). Si las emisiones son muy concentradas o extremadamente tóxicas, probablemente no son aptas para la biorreacción.

Si la corriente de emisión es apropiada, o puede pretratarse para que resulte apropiada, ¿cuál es la tecnología de biorreactores correcta? Esta respuesta depende de las características de la corriente de emisión. Si la corriente de emisión contiene contaminantes que generan ácidos al degradarse (compuestos de azufre o halógeno), un filtro biopercolador o biodepurador podría ser la opción correcta. Si las emisiones no generan ácidos, y hay espacio disponible, un biofiltro podría ser la respuesta. Si se requiere un alto nivel de *DRE*, tal vez se requiera un biodepurador. Sin embargo, tal como se muestra en la sección de costos de este reporte, si se requiere un biodepurador, el elevado costo de capital del mismo podría compensarse por un menor costo de combustible cuando se lo compara con los procesos térmicos. Asimismo, aún corresponden las ventajas ambientales de no producir NO_x o CO adicionales. Si una instalación se encuentra cerca de un límite de emisión o un umbral para cualquiera de estos contaminantes, esto podría ser una ventaja significativa.

Pues bien, la biorreacción es una opción viable de bajo costo en algunas circunstancias, para aquellas instalaciones que tengan emisiones que cumplen con los requisitos exigidos por esta tecnología.

REFERENCIAS

1. Q. Zhang y colaboradores, "Odor Production, Evaluation and Control", Department of Biosystems Engineering, University of Manitoba, octubre de 2002.
2. J. E Burgess, S. A. Parsons y R. M. Stuetz, "Developments in Odor Control and Waste Gas Treatment", School of Water Science, Cranfield University, Bedfordshire, Reino Unido.
3. Peter L. Voigt; "Biofiltration for Odor and VOC Control"; Clean TeQ Publication, Dandeneng, Victoria, Australia, 3175.
4. Joseph S. Devinny, "Clearing the Air Biologically", Civil Engineering Magazine, septiembre de 1998, páginas 46-49.
5. F. Jason Martin, Rust Environmental, y Raymond C. Loehr, Profesor de University of Texas, Austin, "Effects of Periods of Non-Use on Biofilter Performance", Journal of the Air and Waste Management Association, Vol. 46, páginas 534-554.
6. R. Allen Boyette, PE, "Biofiltration Economics and Performance", E & A Consultants, Cary, NC, ~ 2000.
7. Marc A. Deshusses y Huub H. J. Cox, "Biotrickling Filter Air Pollution Control", Department of Chemical & Environmental Engineering, University of California, Riverside, CA, ~ 2000.
8. Huub H. J. Cox y Marc A. Deshusses, "Waste Gas Treatment in Biotrickling Filter", capítulo 4, University of California, Riverside, CA.
9. Bio-Wise, Company Publication, "Biological System Reduces VOC Emissions", Bio-Wise, P.O. Box 83, Didcot, Oxfordshire, OX11 0BR, sito *web*: www.dti.gov.uk/biowise.
10. Mark A. Perkins, PE, William R. Tatem y James S McMillen, EIT; "Multi-Faceted Odor Control Program Controls Costs and get results at a Large Regional Wastewater Treatment Plant"; Trinity River (Texas) Authority; y Alan Plummer and Associates, Inc.
11. C. Wally Sanford, Alternative Control Technology for Bakery Oven Emissions, Reporte de la U.S. EPA Nos. 453/R-92-017, OAQPS, U.S. EPA, diciembre de 1992.
12. Air Compliance Advisor, U.S. EPA, OAQPS/ISEG, 2000.

APÉNDICE A

PREMISAS DE COSTO OPERATIVO DEL DISPOSITIVO DE CONTROL

Tasa de interés %	7%
Tasa salarial de mano de obra de operación \$/hr	\$16.73
Tasa de mano de obra de mantenimiento, \$/hr	\$18.41
Costo eléctrico, \$/kW-hr	\$0.06
Costo de gas natural, \$/M ³	\$0.15
Costo de agua de enfriamiento, \$/M ³	\$0.05653
Costo de desecho de agua, \$/M ³	\$1.007
Costo de vapor, \$/kg	\$0.01097
Costo de desecho de polvo, \$/kg	\$0.02949
Horas anuales de operación	8,000 hr
Ciclo de trabajo	Operación continua

Datos de la corriente de emisión	
Temperatura de escape del horno, °R	258.9
Presión, atmósferas	1
Tasa volumétrica - M ³ /seg	0.3806
Contaminante: Etanol, ppmv	2000
Contaminante: Acetaldehído, ppmv	20

TECHNICAL REPORT DATA
(Please read Instructions on reverse before completing)

1 REPORT NO EPA-456/R-04-002		2	3 RECIPIENTS ACCESSION NO	
4 TITLE AND SUBTITLE Uso de biorreactores para controlar la contaminación del aire			5 REPORT DATE June 3004	
			6 PERFORMING ORGANIZATION CODE	
7 AUTHOR(S)			8 PERFORMING ORGANIZATION REPORT NO	
9 PERFORMING ORGANIZATION NAME AND ADDRESS Clean Air Technology Center (E 143-03) Information Transfer and Program Integration Division Office of Air Quality Planning and Standards U.S. Environmental Protection Agency Research Triangle Park, NC 27711			10 PROGRAM ELEMENT NO	
			11 CONTRACT/GRANT NO	
12 SPONSORING AGENCY NAME AND ADDRESS Office of Air Quality Planning and Standards Office of Air and Radiation U.S. Environmental Protection Agency Research Triangle Park, NC 27711			13 TYPE OF REPORT AND PERIOD COVERED Final	
			14 SPONSORING AGENCY CODE EPA/200/04	
15 SUPPLEMENTARY NOTES For more information, call the Clean Air Technology Center (CATC) Information Line at (919) 541-0800 or access the CATC Web page at < http://www.epa.gov/ttn/catc >.				
16 ABSTRACT This is the Spanish Version of EPA-456/R-03-003, USING BIOREACTORS TO CONTROL AIR POLLUTION. Because of increasing fuel cost and tightening environmental regulations, alternative air pollution control technologies are being considered to replace or supplement expensive combustion control technologies. This technical bulletin addresses one of these technologies, bioreactors. Bioreactors use micro-organisms to destroy pollutants in air emission streams. Using publicly available data, this report: presents information on commercially available bioreaction processes used to control air pollution; considers the limitations of bioreactors; assesses the effectiveness of bioreactors for removing pollutants; and provides information on the capital and operating costs of bioreactors.				
17 KEY WORDS AND DOCUMENT ANALYSIS				
a DESCRIPTORS		b IDENTIFIERS/OPEN ENDED TERMS		c COSATI Field/Group
Biorreacción Biorreactor Biofiltro Biofiltro biopercolador Biodepurador		Control de la contaminación del aire Compuestos orgánicos volátiles VOC Control de olores Contaminantes del aire orgánicos peligrosos HAP orgánicos		
18 DISTRIBUTION STATEMENT Release Unlimited		19 SECURITY CLASS (Report) Unclassified		21 NO OF PAGES 27
		20 SECURITY CLASS (Page) Unclassified		22 PRICE

United States
Environmental Protection
Agency

Office of Air Quality Planning and Standards
Information Transfer and Program Integration Division
Research Triangle Park, NC

Publication No. EPA-456/R-04-002
June 2004
