



Programa de la asignatura:

Ingeniería de biorreactores I

U3

Clasificación, aplicación y
diseño de biorreactores no
convencionales



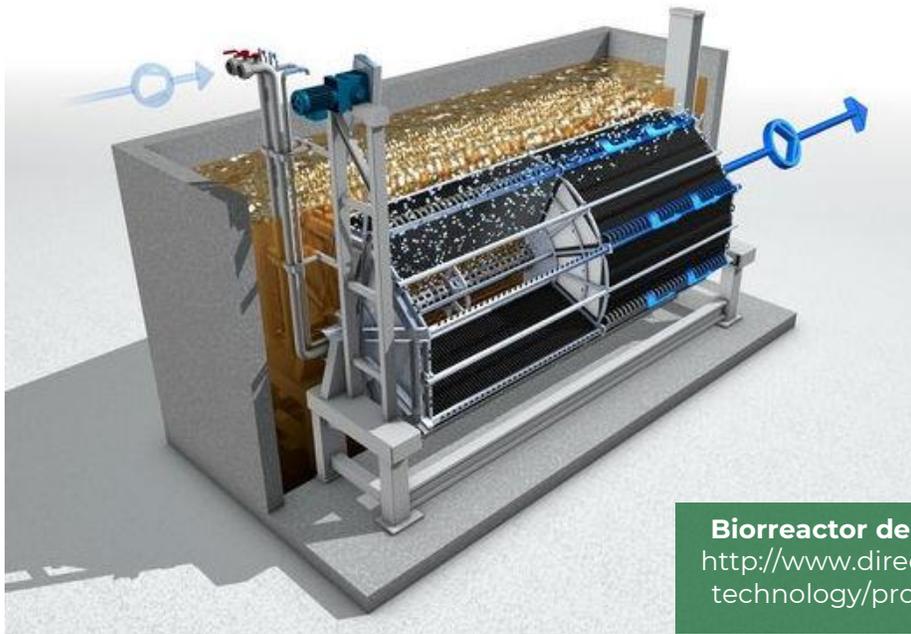
DCSBA



BIOTECNOLOGÍA



Clasificación, aplicación y diseño de biorreactores no convencionales



Biorreactor de membrana. Tomado de:
<http://www.directindustry.es/prod/huber-technology/product-69228-539833.html>



Índice

Presentación.....	4
Competencia específica a desarrollar	5
Propósitos de la unidad.....	6
3.1 Biorreactores no convencionales	8
3.1.1 Biorreactores de lecho fijo.....	10
3.1.2 Biorreactores de lecho fluidizado	20
3.1.3 Biorreactores pulsantes.....	25
3.1.4 Biorreactores agitados por fluidos.....	27
3.1.5 Biorreactores de membrana.....	38
3.1.6 Fotobiorreactores.....	44
3.1.7 Biofermentadores sólidos.....	56
3.2 Diseño de biorreactores.....	66
3.2.1 Diseño y operación de biorreactores de membrana	67
Cierre de Unidad	69
Para saber más.....	69
Fuentes de consulta	71



Presentación

En esta unidad se iniciará el estudio de los biorreactores no convencionales o también llamados avanzados, harás un análisis que te permitirá comprender el funcionamiento y la importancia de una amplia diversidad de estos como son los biorreactores de lecho fijo, de lecho fluidizado, pulsantes, agitados por fluidos, de membrana, fotobiorreactores y de los fermentadores sólidos. Realizarás un análisis enfocado en su aplicación, sus ventajas y desventajas y sobre todo reconocerás cómo su diseño influye en la obtención de una amplia variedad de productos de interés industrial y de valor agregado.

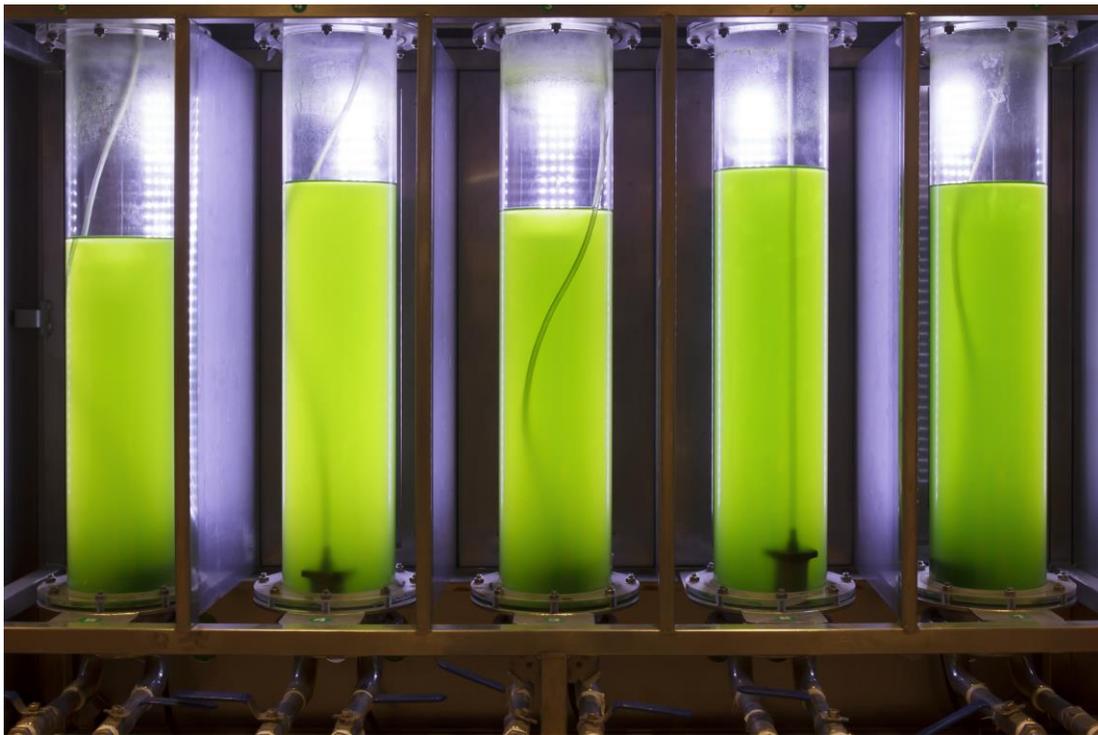


Figura 1. Fotobiorreactor en un laboratorio de biocombustibles algales.

Tomado de:

https://ec.europa.eu/dgs/maritimeaffairs_fisheries/magazine/es/places/finding-new-solutions-old-problems-blue-economy

Asimismo, revisarás con mayor detalle cuáles son los principales tipos de biorreactores no convencionales empleados en el área de la biotecnología y compararás sus costos y efectividad en diversos procesos industriales.



Competencia específica a desarrollar



Analizar los diferentes biorreactores no convencionales para diseñar un modelo de biorreactor mediante la distinción de los tipos de fluidización.



Propósitos de la unidad



- 1 Distinguir los mecanismos de fluidización desde el punto de vista macroscópico y microscópico.
- 2 Identificar los costos de material y mantenimiento de las distintas clases de biorreactores no convencionales.
- 3 Identificar la estructura de un biorreactor de membrana y su funcionamiento.
- 4 Diseñar un modelo de biorreactor de membrana.



Ruta de aprendizaje: ¿Qué debo aprender en esta unidad ?

Unidad 3: Biorreactores. Conceptos y herramientas básicas

#1

Describir los mecanismos de fluidización desde el punto de vista macroscópico y microscópico.

#2

Analizar los diferentes tipos de biorreactores no convencionales.

#4

Reconocer las ventajas y desventajas de diferentes tipos de biorreactores.

#3

Identificar los costos de material y mantenimiento de las distintas clases de biorreactores no convencionales.

#5

Identificar la estructura de un biorreactor de membrana y su funcionamiento.

#6

Describir el diseño un modelo de biorreactor de membrana.





3.1 Biorreactores no convencionales

Uno de los principales problemas actuales es la depuración del agua residual, para solucionarlo se aplican diversos procesos como el pretratamiento, tratamiento primario, secundario y terciario o avanzado, los cuales se complementan dependiendo de la contaminación del agua a tratar.

- Pretratamiento: consiste en la eliminación de sólidos gruesos suspendidos, grasas/ aceites, que puedan ocasionar problemas de mantenimiento y funcionamiento de los procesos posteriores.
- Tratamiento primario: reduce alrededor de 30 % de la materia orgánica y un 60 % de sólidos suspendidos.
- Tratamiento secundario: elimina el resto de compuestos orgánicos biodegradables y sólidos suspendidos mediante procesos físicoquímicos (precipitación, coagulación, floculación) y biológicos, donde las bacterias son el principal agente purificador en forma de biomasa. Estos se dividen en biorreactores **convencionales** (utilizan lodos activados, lagunas aereadas, zanjas de oxidación, filtros rociadores, biodiscos o combinados) y **no convencionales**. Estos últimos son conocidos como los de **alta tasa** que a su vez se subdividen en **tres generaciones** según la manera en que la biomasa se desarrolla dentro de ellos; en la **primera** la biomasa se encuentra la suspensión (fosa séptica, Tanque Imhoff, lagunas anaerobias, digestores convencionales, etc.); en la **segunda**, los microorganismos son retenidos dentro del reactor suministrándoles soportes inertes o mediante sedimentación (reactores de lecho fijo, reactores híbridos, etc.) y los de **tercera**, la masa biológica es retenida mediante un soporte que se expande o fluidifica con altas velocidades de flujo (reactor de lecho expandido y fluidizado).
- Tratamiento terciario o avanzado: se encarga de la remoción de nutrientes para prevenir eutrofización de las fuentes receptoras o bien para incrementar la calidad de un efluente secundario para un reúso adecuado.

Sin embargo, para la elección del tipo de sistema a utilizar en el tratamiento de agua residual debe de tomarse en cuenta que este tenga características de costo-beneficio apropiadas que contribuyan a obtener mejores posibilidades de éxito (Pérez Cortés & Villegas Peña, 2004). Es



importante resaltar que los sistemas de alta tasa (**no convencionales o avanzados**) que a diferencia de los convencionales ofrecen una excelente remoción de contaminantes sin requerir de reactivos químicos, energía eléctrica excesiva, operación y mantenimiento especializado que los constituyen como una solución técnica y económicamente atractiva.

Los biorreactores avanzados o no convencionales de los cuales podemos encontrar una gran variedad (Figura 2), al igual que los convencionales, tienen como finalidad proveer a los microorganismos involucrados condiciones ambientales adecuadas (mezclado, suministro de oxígeno, temperatura, control del pH, entradas para adición de nutrientes, entre otros) que permitan una biotransformación eficiente de la materia.

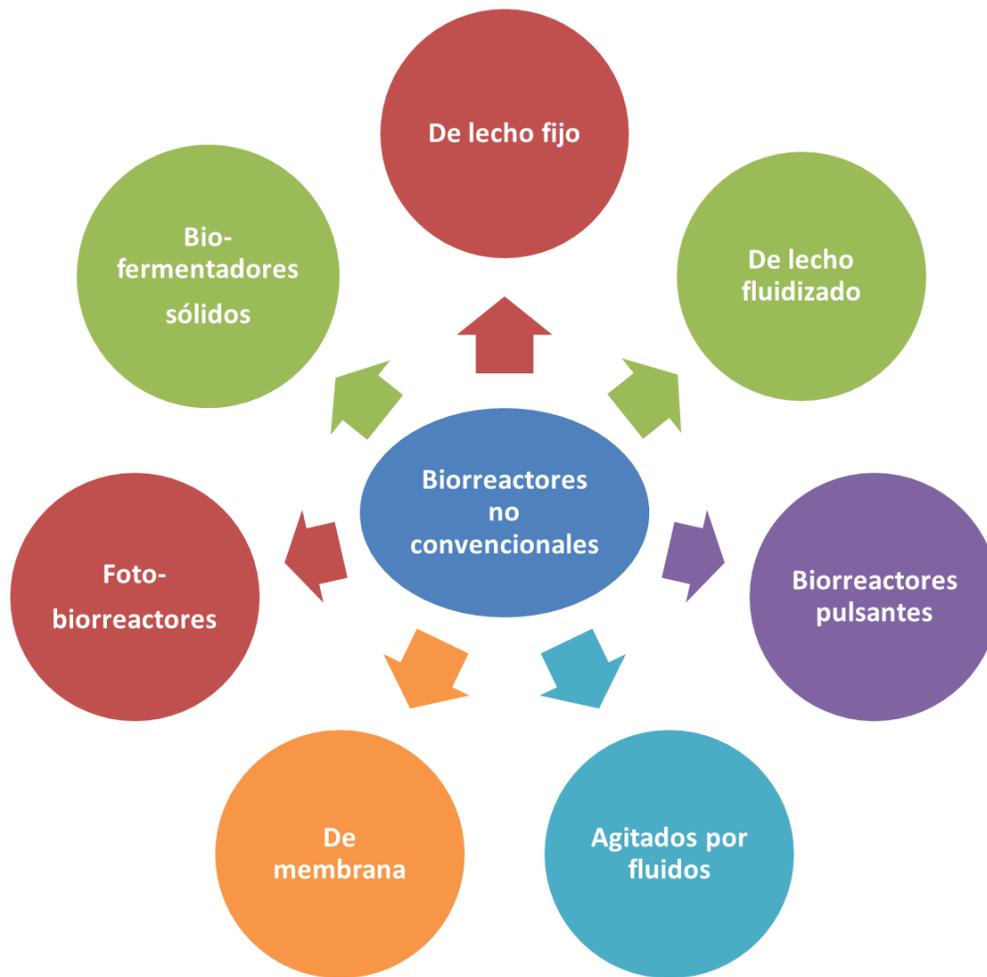


Figura 2. Clasificación de los biorreactores no convencionales o avanzados.



A continuación, se presentan las características principales de los biorreactores no convencionales, así como sus principales componentes y sus diversas aplicaciones que te permitirán proponer un diseño para resolver un problema particular.

3.1.1 Biorreactores de lecho fijo

Para comenzar debes hacerte algunas preguntas que te ayudarán a comprender el origen de este tipo de biorreactores.

¿Alguna vez has observado como brota el agua del suelo? ¿Has escuchado que las personas de esos lugares dicen ¡“esa sí es agua pura”!? ¿Has notado que cuando la gente compra agua embotellada prefiere la que proviene de los manantiales? ¿A qué crees que se deban estas interrogantes?

Para poder responder lo anterior, debes conocer la definición de manantial. Un manantial es un cuerpo de agua que se forma cuando existe salida natural del agua subterránea, es decir, de aquella que se encuentra debajo de la superficie de la tierra que proviene de la infiltración a través del suelo, del agua de lluvia, de ríos, lagos o bien de la nieve que se derrite. Pero... ¿qué características posee para que el agua sea considerada pura o que tenga menores cantidades de sustancias que el agua superficial?

Lo anterior es el resultado del descenso del agua ya que esta circula, por años, a través de materiales naturales. Tiene un movimiento vertical, es decir, va pasando por partículas de tierra, arena o roca (denominados lechos) hasta que llega a una zona impermeable que la detiene. En ocasiones, estos lechos albergan microorganismos (bacterias crecen sobre su superficie y utilizan ciertas sustancias orgánicas e inorgánicas presentes en el agua para mantener sus funciones vitales de tal manera que las metabolizan y las eliminan). Esa agua con menos concentración de contaminantes encuentra una salida natural hacia la superficie, que es lo que nosotros conocemos como manantial (Figura 3).



Figura 3. Proceso de filtración de un manantial de agua mineral. Tomado de: <http://institutoaguaysalud.es/agua-mineral-natural/que-es-el-agua-mineral/>

El caso previamente descrito es un ejemplo natural de un biorreactor de lecho fijo ya que presenta un lecho sólido empacado (tierra) que sirve como soporte para los microorganismos (encargados de descomponer y asimilar la materia orgánica) y a través del cual pasa un fluido (agua) en dirección vertical.



Biorreactor de lecho fijo

Un biorreactor de lecho fijo o biofiltro consiste en una columna empacada con un sólido (lecho) en la que se hace pasar un fluido (líquido o gas). Estos sistemas operan en posición vertical (Cárdenas *et al.*, 2003).

En este tipo de biorreactor, el lecho se ubica en la parte interna del dispositivo y actúa como un filtro bacteriano, donde tienen lugar las reacciones de descomposición, asimilación y desarrollo de biomasa, es decir, en la superficie del sólido, se desarrolla la población de bacterias que están inmovilizadas en el biorreactor.

En otras palabras, el lecho del biorreactor puede ser un material sólido orgánico, por ejemplo: composta, turba, rocas porosas, cáscaras de cacahuate, de arroz o madera; en el que crece la población microbiana. A través de él pasa el fluido que contiene los sustratos que se desean transformar y que son absorbidos, degradados o consumidos por la biopelícula o biofilm formada en la superficie del lecho. La composición del soporte juega un papel muy importante debido a que influye en la asimilación y transformación de los sustratos ya que provee a los microorganismos de las condiciones adecuadas de pH, temperatura, humedad, nutrientes y flujo de oxígeno.

Biopelícula o biofilm

Se describe como una estructura compleja formada por agregados celulares (grupos de células densamente empaquetados) y huecos intersticiales, adherida a un material que puede ser de origen natural o sintético. Su estructura es morfológica y fisiológicamente distinta a la de bacterias libres, utilizándose incluso mediadores químicos intercelulares para desarrollar la película (Gálvez Rodríguez, 2001).



La dirección del flujo en este tipo de sistemas puede ser axial (Figura 4), si la dirección del flujo es la misma que la del eje de rotación (por ejemplo, la dirección del agua dentro de una manguera) o radial, si la dirección se acerca o se aleja del eje de rotación (por ejemplo, cuando fluye el agua en el inodoro, lo hace hacia el centro del desagüe).

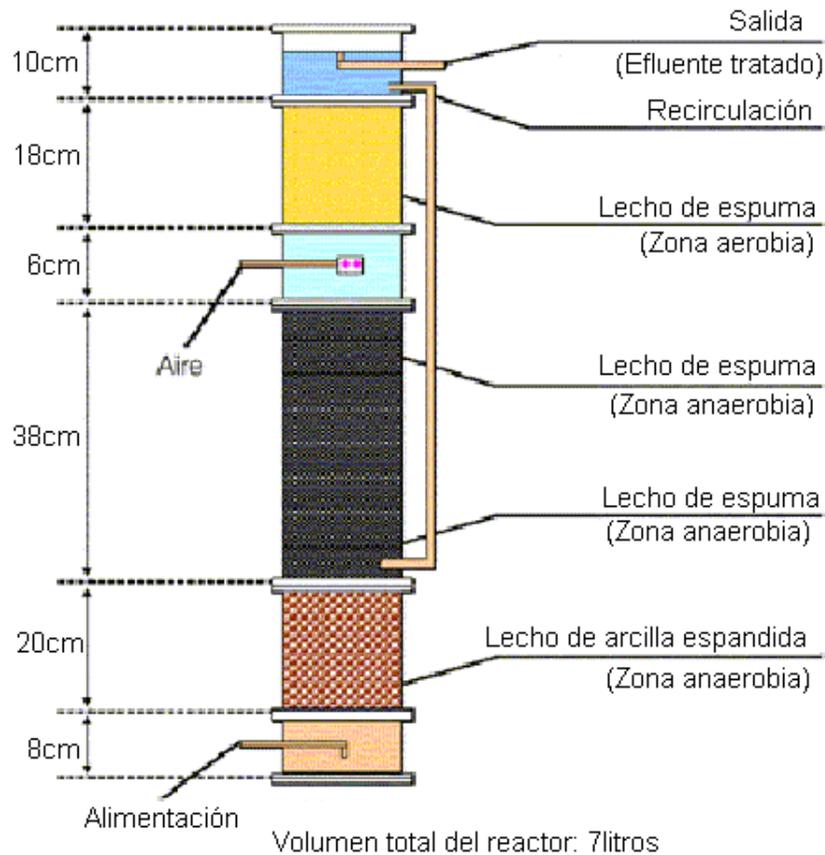


Figura 4. Reactor anaerobio-aerobio de lecho fijo y flujo ascendente con recirculación de la fase líquida. Tomado de: Anzola *et al.*, 2008.



Biofiltración

Se define como todo proceso biológico utilizado para el control o tratamiento de compuestos volátiles orgánicos e inorgánicos presentes en la fase gaseosa. En la biofiltración, los microorganismos son los responsables de la degradación biológica de los contaminantes volátiles contenidos en corrientes de aire residual (Cárdenas *et al.*, 2003).

Los biorreactores de lecho fijo o biofiltros pueden clasificarse en tres grandes grupos:



Esta clasificación se basa en las condiciones en las que se encuentran los microorganismos en el sistema y del patrón de flujo de la fase líquida (Tabla 1).



Tabla 1. Clasificación de los biofiltros en función de la fase líquida y biológica (Cárdenas *et al.*, 2007).

Tipo de biofiltro	Fase biológica	Fase líquida
Biolavador	Dispersa	En movimiento
Biofiltro de lecho escurrido	Inmovilizada	En movimiento
Biofiltro de lecho fijo	Inmovilizada	Inmóvil

De acuerdo con Cárdenas *et al.* (2003):

a) Los **biofiltros de lecho fijo** (BLF) constan de un lecho empacado que se conoce como material filtrante y que puede ser sintético u orgánico que sirve como soporte para los microorganismos y en el caso de los orgánicos como fuente de nutrientes para el crecimiento microbiano (Figura 5). Empleándose como materiales filtrantes rocas porosas, tierra de diatomeas, perlita, tierra, trozos de maderas, diferentes tipos de compostas, residuos orgánicos tales como cáscaras de cacahuate, de arroz o de coco, fibra de caña de azúcar, entre otros.



Figura 5. Reactor de lecho fijo. Tomado de: <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/libros/396/biofiltra.html>



El principio de los biofiltros de lecho fijo consiste en hacer pasar la corriente gaseosa saturada de humedad que contiene al contaminante a través del lecho en donde los contaminantes son degradados por los microorganismos.

Tabla 2. Ventajas y desventajas de los biofiltros de lecho fijo (Cárdenas *et al.*, 2003).

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> • Altas superficies de contacto gas-líquido. • Fácil arranque y operación. • Bajos costos de inversión. • Soporta periodos sin alimentación. • Conveniente para operación intermitente. • No produce agua de desecho. 	<ul style="list-style-type: none"> • Poco control sobre fenómenos de reacción. • Baja adaptación a altas fluctuaciones de flujo de gas. • Grandes volúmenes de reactor. • No conveniente para tratamiento de contaminantes cuyos subproductos son compuestos ácidos

b) El **biofiltro de lecho escurrido** (BLE) consta de una columna empacada con un soporte inerte (usualmente de material cerámico o plástico) donde se desarrolla la biopelícula (Figura 6). A través del lecho se alimenta una corriente gaseosa que contiene al sustrato por biodegradar y una corriente líquida que es comúnmente reciclada a través del lecho y que tiene la función de aportar nutrientes esenciales a la biopelícula, así como de remover los productos de degradación de los microorganismos. Estos sistemas se recomiendan para compuestos solubles en agua. La operación de absorción y biodegradación del contaminante en los BLE se lleva a cabo en un solo reactor, lo cual los pone en ventaja sobre los biolavadores respecto a la huella física y la operación del mismo. Se ha reportado que en ambos sistemas el principal problema de operación es la solubilización del gas en la fase acuosa, aunque es menos crítico en los BLE.

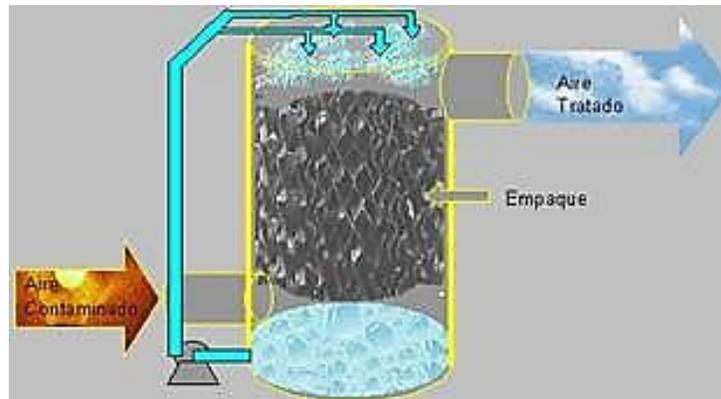


Figura 6. Biofiltro de lecho escurrido. Tomado de: <http://www.emison.com/biofiltracion.html>

Tabla 3. Ventajas y desventajas de biofiltros de lecho escurrido (Cárdenas *et al.*, 2003).

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> • Control de concentración de sustratos. • Posibilidad de evitar acumulación de subproductos. • Equipos compactos con respecto a los BLF y BLE. • Baja caída de presión. • Alta transferencia de oxígeno y del contaminante. 	<ul style="list-style-type: none"> • Baja densidad celular. • Generación de lodos. • No resiste periodos sin alimentación. • Necesidad de suministrar nutrientes. • Altos costos de inversión, operación y mantenimiento. • Taponamiento por biomasa. • Producción de agua de desecho.

c) Los **biolavadores** (BL) difieren de los biofiltros, en los biolavadores el compuesto a degradar primero es absorbido en la fase líquida localizada en una torre de absorción llena de líquido (Figura 7). La operación consiste en



hacer fluir el gas a contracorriente a través del líquido donde los contaminantes y el O_2 son absorbidos. Posteriormente, el líquido es alimentado a un reactor empacado de un material inerte cubierto de la película biológica encargada de degradar al contaminante. Los BL son los sistemas más adecuados para el tratamiento de compuestos muy solubles en agua.

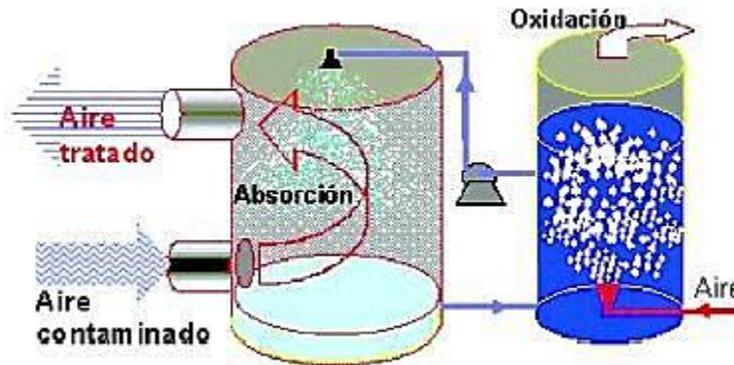


Figura 7. Esquema de un biolavador. Tomado de:
<https://www.estrucplan.com.ar/Producciones/imprimir.asp?IdEntrega=2707>

Las principales **ventajas** de los biolavadores son:

- La recirculación del líquido que favorece la no acumulación de productos que pudieran tener efectos nocivos para los microorganismos.
- La facilidad de control del proceso biológico a través de la composición del medio líquido.

Sin embargo, el requerimiento de dos equipos, uno para la absorción y otro para la biodegradación del contaminante, los hace poco convenientes con respecto a los biofiltros de lecho escurrido.



Tabla 4. Ventajas y desventajas de biolavadores (Cárdenas *et al.*, 2003).

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> • Mejor control de la reacción. • Posibilidad de evitar acumulación de subproductos. • Equipos compactos. • Baja caída de presión. 	<ul style="list-style-type: none"> • Baja densidad celular. • No soporta periodos sin alimentación. • Genera lodo residual. • Necesidad de aireación extra. • Altos costos de inversión, operación y mantenimiento. • Necesidad de suministrar nutrientes.

En los BLF y en los BLE, el lecho filtrante es el hábitat de los microorganismos, por lo que se deben utilizar materiales de gran disponibilidad en el sitio de operación del sistema, así como un bajo costo. En general, se prefiere que los materiales filtrantes contengan los nutrientes necesarios para el metabolismo microbiano, sin embargo, en ausencia o baja concentración de estos pueden adicionarse mediante solución de nutrientes. Para los BLF esta solución se agrega periódicamente por aspersión. Para los BLE, las soluciones minerales se agregan al líquido en movimiento (Cárdenas *et al.*, 2003).

El **material filtrante** debe tener una buena capacidad de retención de agua ya que los microorganismos requieren de una importante cantidad de agua para crecer. El rango óptimo de humedad del material filtrante en sistemas de biofiltración se considera entre 40 y 60 %. Un bajo contenido en el lecho filtrante reduce el espesor de la biopelícula y merma la actividad microbiológica y, por consiguiente, la actividad del biofiltro. Por otro lado, un elevado contenido de humedad puede crear una saturación, provocando zonas anaerobias o incrementar la caída de presión. El pH de estos sistemas debe ser regulado ya que numerosos procesos de oxidación generan productos ácidos, básicos o inhibitorios, como los compuestos



clorados, azufrados y amonio entre otros. En general, la capacidad amortiguadora se logra mediante la adición de compuestos tales como carbonatos de calcio o como conchas de ostión para los BLF o mediante la adición de soluciones amortiguadoras líquidas en el caso de los BLE (Cárdenas *et al.*, 2003).

Finalmente, para **el diseño de este tipo de biorreactores** debes tomar en cuenta que:

- a) los sustratos a transformar deben ser **biodegradables** y **no tóxicos**.
- b) los sustratos deben ser **solubles** o moderadamente solubles.
- c) el **metabolismo microbiano** se favorece a bajas concentraciones de sustrato.

Al finalizar este tema hemos revisado los diferentes tipos de biofiltros, sus características más importantes, ventajas y desventajas, así como aquellos elementos más importantes que se deben considerar para realizar una propuesta de diseño de este tipo de biorreactores.

3.1.2 Biorreactores de lecho fluidizado

En los últimos años, una de las principales aplicaciones de los biorreactores ha sido en el tratamiento de aguas residuales y en los procesos de fermentación, empleándose preferentemente los sistemas de lecho fluidizado, debido a las ventajas que tienen en comparación con otros procesamientos convencionales.

Con su utilización se promueven sistemas homogéneos, por lo que los microorganismos involucrados están en contacto directo con la fase líquida. Además, existe una alta transferencia de oxígeno, se descarta el reciclado de las células e implica bajos costos de operación y de capital.

En los biorreactores de lecho fluidizado (Figura 8), los microorganismos se desarrollan sobre la superficie de un sólido o soporte de pequeño tamaño. Cuando el fluido (líquido) se hace pasar a una velocidad suficiente elevada a través de las partículas sólidas (flujo ascendente), estas son suspendidas, es decir, se provoca la fluidización del lecho. Por lo que, en el arranque del reactor se dispone de un sistema bifásico (sólido-líquido), sin embargo, con el desarrollo de la actividad microbiana, se produce gas, de tal forma, que existe un cambio a trifásico (sólido-líquido-gas)

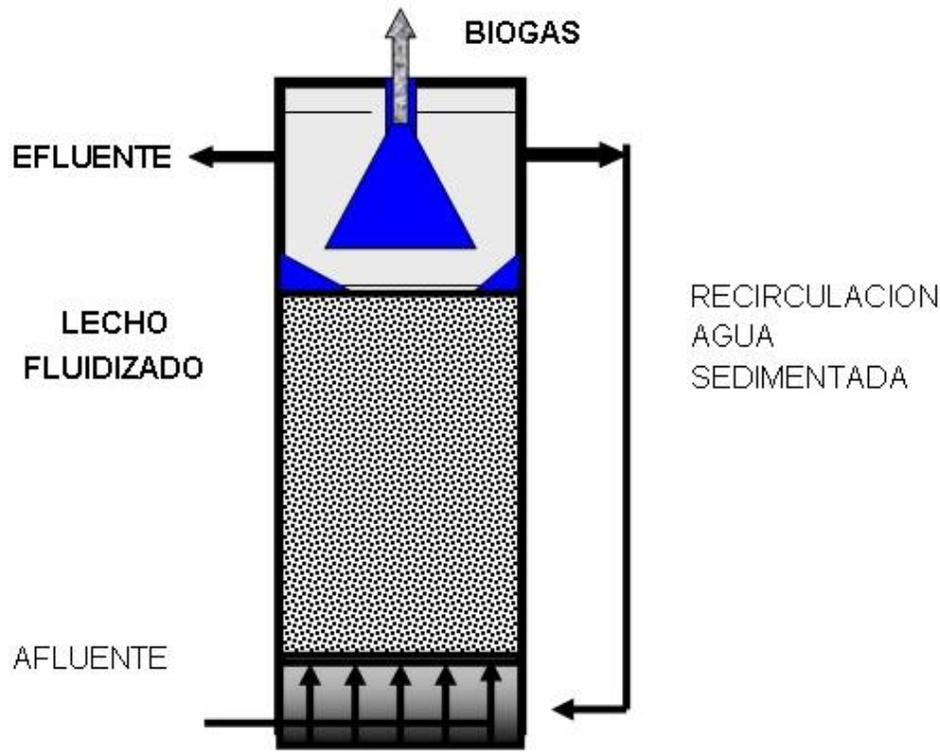


Figura 8. Reactor anaerobio de lecho fluidizado. Tomado de:
http://datateca.unad.edu.co/contenidos/301332/contLinea/leccin_5_reactores_d_e_tercera_generacin.html

El tipo de flujo que se presenta en estos sistemas es generalmente de transición entre laminar y turbulento, es decir, pasa de ordenado, suave y estratificado a caótico. Existen corrientes verticales de partículas ascendentes y descendentes.

Otra característica de estos biorreactores que debes tomar en cuenta es la expansión, esto es cuando el sistema aún no se pone en marcha, el lecho tiene una determinada altura que permanece constante, una vez que se hace pasar el fluido a través de las partículas sólidas y estas son suspendidas, el fluido tiende a alcanzar una velocidad mínima, en este momento se observan cambios en la altura, lo que se conoce como expansión del lecho. Estos sistemas presentan las siguientes ventajas:



Tabla 5. Ventajas de los biorreactores de lecho fluidizado (Cárdenas *et al.*, 2003).

Ventajas
<p>a) Se favorece la mezcla hidráulica dentro del sistema, debido a la recirculación.</p> <p>b) Se mejora la actividad de la biomasa ya que se favorece el contacto entre los microorganismos y el sustrato.</p> <p>c) Se requieren bajos costos de inversión en equipamiento y operación.</p>

En un biorreactor de lecho fluidizado, los **microorganismos** se desarrollan sobre la superficie de un sólido o soporte de pequeño tamaño.

Entre los materiales que se emplean como soporte se encuentran: arena, biolita, espuma de vidrio, resinas sintéticas, vermiculita, antracita, polietileno, entre otros. Estos materiales se caracterizan por tener bajas densidades, diámetro de partícula entre 0.1 y 0.5 mm, su forma tiende a ser esférica, son resistentes a la abrasión, tienen una superficie rugosa y son porosos.

El cuerpo del biorreactor se puede construir en acrílico, vidrio o acero inoxidable, en este último caso, se suele recubrir de un material refractario, por ejemplo, la gunita.

Gunita

Mortero a base de cemento, áridos de gran pureza y seleccionada granulometría y aditivos químicos. Producto de excelente adherencia y bajo índice de rebote, compatible con todos los soportes, de gran trabajabilidad y altas resistencias mecánicas iniciales (MASTEC, 2016).



De acuerdo con Flórez y Posada (2007), se recomienda que el material del cuerpo del biorreactor tenga las siguientes características:

- Debe permitir observar el comportamiento del lecho.
- Debe ser resistente a altos tiempos de operación y a la carga volumétrica.
- Debe ser resistente al impacto y a la oxidación.

Con lo que respecta al lecho, es necesario que este:

- Sea afín con el microorganismo a inmovilizar.
- El tamaño de partícula debe estar entre 90-650 μm .
- La altura del lecho sin fluidizar debe ser máximo del 50% de la altura del reactor.

La siguiente tabla muestra las ventajas y desventajas de un reactor de lecho fluidizado:



Tabla 6. Ventajas y desventajas de los reactores de lecho fluidizado (Flórez & Posada, 2007).

Ventajas	
Modo de operación	La operación puede llegar a ser continua, semicontinua o tipo batch. Lo cual hace del reactor de lecho fluidizado una alternativa versátil.
Temperatura	A lo largo del lecho se encuentra uniformidad en la temperatura, lo que permite su control y se evita la formación de puntos calientes en algunas partes del reactor.
Desempeño químico	El uso de partículas pequeñas genera una menor resistencia a la difusión del poro teniendo como consecuencia una mayor eficiencia.
Mezclado de partículas	Existe mejor contacto entre el sólido y el fluido evitando gradientes de concentraciones, asegurando así mayor eficiencia.
Control	El reactor funciona de manera continua y se puede controlar de manera automática.
Desventajas	
Expansión del lecho	Una expansión del lecho muy alta, aumenta la dimensión del reactor incrementando los costos de capital.
Estudio del comportamiento hidrodinámico	Puede resultar complicado el modelamiento del reactor generando ciertas incertidumbres sobre su desempeño al momento de escalar el proceso.
Condiciones mecánicas	La abrasión causa erosión de tuberías y accesorios.

La revisión de este tipo de biorreactores contribuirá a que reconozcas las ventajas de la utilización de la fluidización, cuáles son las ventajas de su utilización en los diversos campos industriales.



3.1.3 Biorreactores pulsantes

Desde el punto de vista biotecnológico, los estudios relacionados con la temática del presente subtema se relacionan con el diseño de **biorreactores de lecho fluido pulsante**.

Son aquellos en los que los microorganismos se desarrollan sobre la superficie de un sólido o soporte de pequeño tamaño, por el que se hace pasar un fluido (líquido o gas), lo que genera la suspensión de las partículas sólidas, es decir, se provoca la fluidización del lecho; la diferencia entre un biorreactor de lecho fluidizado y uno de lecho de fluido pulsante, radica en que, en este último el fluido que se hace pasar por el lecho, es impulsado aplicando oleadas intermitentes de presión, a través de bombeo, es decir, el flujo no es constante. Este impulso estimula las velocidades de transferencia del fluido en la columna, debido al aumento del área interfacial (minado hacia arriba) y de los coeficientes de transferencia de materia.

Una ventaja de este tipo de biorreactor es que se aprovechan los beneficios de la pulsación para permitir la agitación del sistema (King, 2003). De manera general, los biorreactores pulsantes responden a **dos diferentes** esquemas de operación:

Involucra el movimiento alternado de algunos elementos pertenecientes a la columna, es decir, **la pulsación es generada por medio del movimiento ascendente y descendente de las placas o a través de un dispositivo o conector acoplado a la columna**. Este tipo de operación se observa en biorreactores pulsantes de placas, biorreactores pulsantes de pistón y biorreactores pulsantes neumáticos (Roca, et al. 1994). Un ejemplo de aplicación de estos dispositivos es en la **producción de biodiesel**, para lo que se emplean reactores de flujo oscilatorio, los cuales se forman por un compartimiento cilíndrico que contiene placas perforadas a intervalos regulares. El caudal se bombea de manera pulsante, lo que mejora la transferencia de calor y masa. Las conversiones reportadas son del 99 % en 30 minutos (Tozzi, 2010).

La pulsación se genera por medio de la transmisión hidráulica de una perturbación al fluido contenido en la columna. En esta categoría se encuentran los biorreactores que utilizan la misma bomba de desplazamiento positivo para incorporar el sustrato y el sistema de pulsación neumático. La pulsación se genera por medio de la



incorporación de gas a presión que impulsa el líquido ubicado en un brazo paralelo a la columna, es decir, se presenta en biorreactores pulsantes neumáticos (Roca, *et al.*, 1994). Los biorreactores pulsantes con autopropulsión, también entran dentro de este grupo. En estos, el sustrato es inyectado a la columna con el mismo ciclo que la pulsación, la cual puede ser generada por una membrana elástica con interruptor o por un ordenador cíclico (Roca, *et al.*, 1994).

El uso de biorreactores pulsantes permite una mejor distribución de calor al mismo tiempo que reduce la dispersión axial, lo que favorece el desarrollo de un gran número de procesos bioquímicos (Wilhite *et al.*, 2004). Experimentos recientes han demostrado que trabajar con estos dispositivos puede aumentar hasta un **30 % la eficiencia** de las biotransformaciones que se llevan a cabo en estos sistemas (Wilhite, *et al.*, 2001).

Los biorreactores pulsantes experimentales suelen construirse en vidrio, acrílico o acero inoxidable; con dispositivos anexos fabricados en diversos polímeros, por ejemplo, pulsadores elásticos de membrana, cuya apertura se controla mediante electroválvulas.

Estos sistemas disponen de elementos de agitación por pulsos (platos o émbolos), por lo que favorecen bioprocesos aerobios continuos, en donde el medio es de alta viscosidad. Se suelen utilizar para la producción de metabolitos y para el tratamiento de residuos. Otra aplicación de estos biorreactores es para la producción de biodiesel, a través de sistemas tubulares con placas perforadas a intervalos regulares. El caudal se bombea de manera pulsante, con lo que logra una mejor transferencia de masa y calor.

Al finalizar este tema has adquirido los elementos necesarios para comprender cómo es que al mantener el proceso que se lleva dentro del biorreactor se ve beneficiado por los diferentes tipos de pulsaciones, asimismo identificaste qué tan eficientes son en cuanto a las biotransformaciones que se llevan en él.



3.1.4 Biorreactores agitados por fluidos

Para introducirte a este tipo de biorreactores se utilizará un ejemplo que puede ser fácil de entender. Como ya has revisado en la Unidad 1 existen varios tipos de enzimas, dentro de estos uno de los más conocidos es el del fruto de la papaya (Figura 9) la cual contiene una enzima proteolítica llamada **papaína** que tiene la capacidad para digerir proteínas de los alimentos, es por ello que nos ayuda a mejorar la digestión, además, se emplea como ablandador de carnes y en la clarificación de cervezas y otras bebidas.



Figura 9. Papaya (*Carica papaya*).

Tomado de:
<http://www.taotv.org/wp-content/uploads/2011/08/papaya.jpg>

Las plantas, desde tiempos remotos hasta nuestros días, han sido de gran importancia ya que además de representar una fuente de alimento también proveen compuestos medicinales o de otras sustancias que actualmente se emplean como insecticidas, saborizantes, colorantes, fragancias, entre otras aplicaciones.

La mayoría de estos compuestos provienen de plantas cultivadas en grandes extensiones de terreno, sin embargo, las repercusiones que esto tiene para la conservación del suelo ha sido uno de los principales obstáculos para su explotación. Debido a esto, la biotecnología ha desarrollado el cultivo de células vegetales que considera que cada célula es una unidad independiente capaz de formar un organismo completo si se le proporcionan condiciones favorables, es decir, se pueden cultivar plantas completas, embriones, órganos, callos y células en suspensión, siempre y cuando se utilicen biorreactores que permitan el control de condiciones asépticas, de la concentración del sustrato y de la temperatura.



Todo esto, se ha utilizado para el cultivo de callos y células en suspensión de la *Jacaratia mexicana* (Figura 10), otra fuente importante de enzimas proteolíticas, similares a la papaína.



Figura 10. Especie *Jacaratia mexicana*. Tomado de: <http://www.inaturalist.org/photos/1446057>

Por lo tanto, se puede decir que el cultivo de células vegetales es una alternativa para aislar metabolitos secundarios de interés industrial que pueden ser utilizados en una gran diversidad de campos que pueden ir desde la industria farmacéutica hasta la de alimentos.

Metabolitos secundarios

Moléculas orgánicas sintetizadas por las plantas, que no parecen tener una función directa en procesos fotosintéticos, respiratorios, asimilación de nutrientes, transporte de solutos o síntesis de proteínas, carbohidratos o lípidos, los cuales poseen una gran cantidad de utilidades en la biología de las plantas (Ávalos-García & Pérez-Urria Carril, 2009).



Para la obtención de este tipo de compuestos se utilizan biorreactores agitados por fluidos ya que estos presentan un adecuado gradiente de velocidad de fluido (velocidad de corte), debido a que se ha demostrado que las células vegetales son sensibles a los esfuerzos de corte. Dentro de estos dispositivos se pueden encontrar los biorreactores airlift, agitados y de columna de burbujeo.

Los biorreactores agitados son dispositivos cilíndricos en los que el mezclado se realiza a través de medios mecánicos (Figura 10). El aire estéril (libre de microorganismos y esporas), que se inyecta por la parte inferior del tanque, pasa por un plato o anillo de aspersion, que posee pequeños orificios y choca con las paletas de la turbina inferior, dando lugar a burbujas que permiten la difusión de oxígeno hacia el seno del líquido. La temperatura necesaria para el proceso se suministra a través de camisas o serpentines externos con recirculación de agua.

Los **sistemas de control** que constituyen a este dispositivo son (Figura 11):

- a) Control de la velocidad del motor.
- b) Control de la temperatura (formado por un intercambiador de calor, un sistema de control de válvulas de entrada y salida de líquido frío y caliente, un sensor de temperatura y un sistema regulador de flujo).
- c) Control de pH (formado por un sistema dispensador de ácido y base, una bomba peristáltica, un filtro microporo, un sistema de control y uno de medición).
- d) Difusor de aire y motor de agitación.

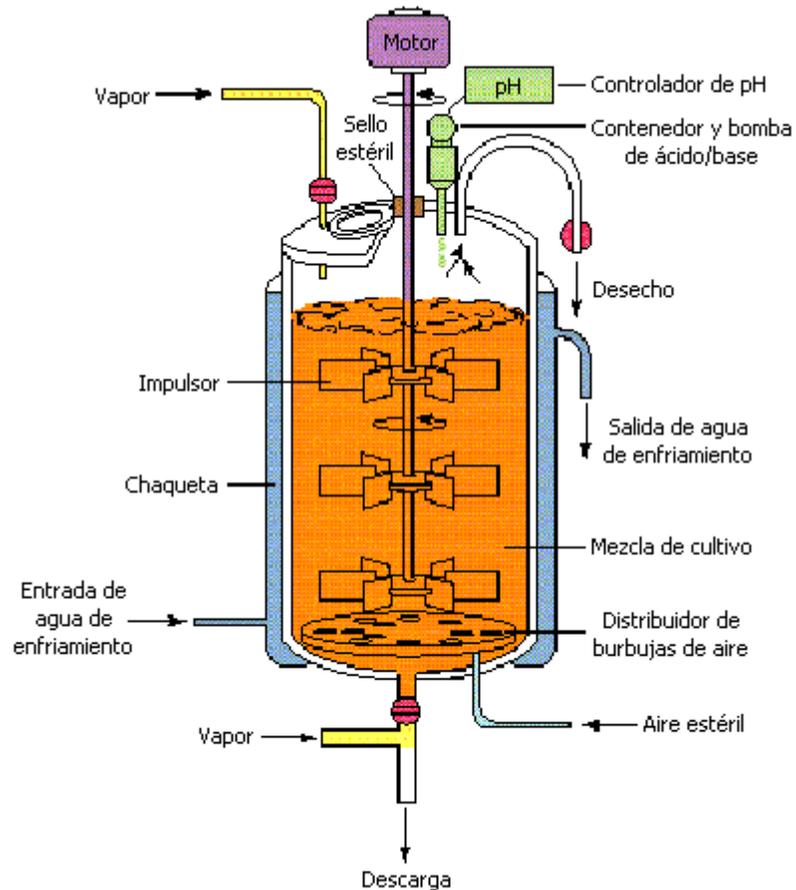


Figura 11. Biorreactor agitado. Tomado de: <http://biorreactores.tripod.com/C6BMM.htm>

Debido a que los sistemas biológicos son susceptibles al daño celular por las elevadas velocidades de agitación, se recomienda que la velocidad del rotor se reduzca como mínimo a 600 rpm.

Los biorreactores de columna de burbujeo disponen de un eyector de gas en el fondo del dispositivo, que lo suministra en forma de pequeñas burbujas, permitiendo su difusión en el líquido y el mezclado del medio de cultivo. Operan bajo régimen continuo y semicontinuo (Figura 12).

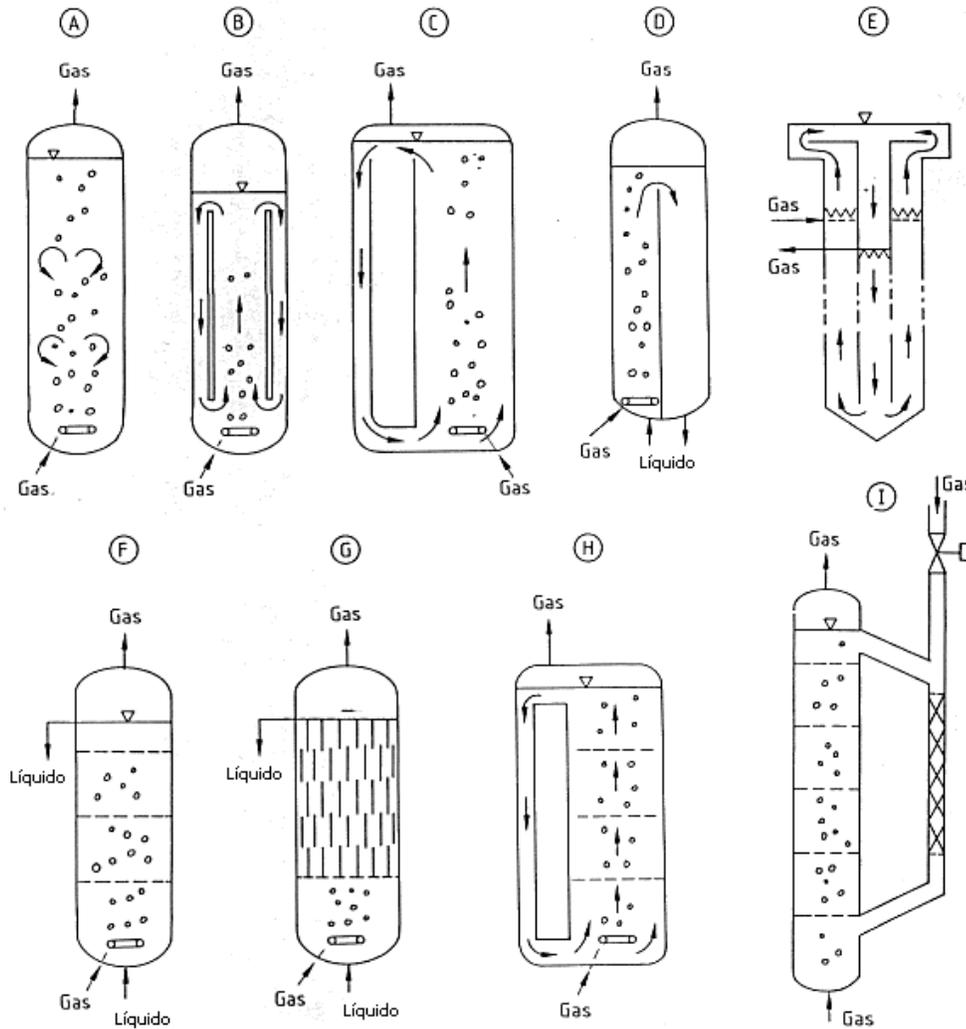


Figura 12. Biorreactores de columna de burbujeo. A) Columna de burbujeo; B) Reactor con recirculación de gran tamaño; C) Reactor con recirculación externa; D) Reactor con recirculación con pared divisoria; E) Reactor con recirculación de flujo hacia abajo; F) Columna de burbujeo con platos perforados; G) Columna de burbujeo con mezcladores estáticos; H) Reactor con recirculación por etapas; I) Columna de burbujeo pulsante con deflectores. Tomado de: <http://biorreactores.tripod.com/C6RCBSD.htm>

En el modo continuo, el gas y el medio de cultivo fluyen simultáneamente hacia el cuerpo del digestor. La suspensión que deja la columna es reciclada hacia el tanque de alimentación.

En el modo semicontinuo, el medio de cultivo permanece estacionario y existe burbujeo constante.



Los sistemas de control que constituyen estos dispositivos son:

- a) Control de flujo de gas.
- b) Control de temperatura.
- c) Sensores de flujo de calor.
- d) Control de presión.

En los biorreactores de columna de burbujeo existen 3 regímenes (Tabla 7).

Tabla 7. Regímenes de biorreactores de columna de burbujeo (Díaz, 2001)

1. Régimen homogéneo	Se presenta cuando la velocidad de suministro del gas es baja (menor de 5 cm/s) por lo tanto, existe un mezclado suave. Las burbujas formadas son uniformes y de tamaño pequeño. No existe fusión entre burbujas.
2. Régimen heterogéneo	Se presenta cuando la velocidad de suministro de grandes cantidades de gas es alta (mayor de 5 cm/s). Existe movimiento turbulento de las burbujas, las cuales tienen gran tamaño (debido a la fusión de burbujas más pequeñas) y poca duración.
3. Régimen de flujo slug.	Se presenta en biorreactores con un diámetro pequeño y elevados flujos de gas. En este régimen se presenta la formación de burbujas que se mueven lentamente cuando en la pared del reactor se han estabilizado burbujas de mayor tamaño.

Un biorreactor airlift es un dispositivo cilíndrico formado por una zona ascendente, en la que se inyecta el gas, y una zona descendente (Figura 13). La incorporación del gas en el sistema origina una disminución de la presión lo que ayuda a la recirculación del fluido y en consecuencia la fluidización de la biomasa. La circulación del flujo en el interior del dispositivo puede ser externa o interna.

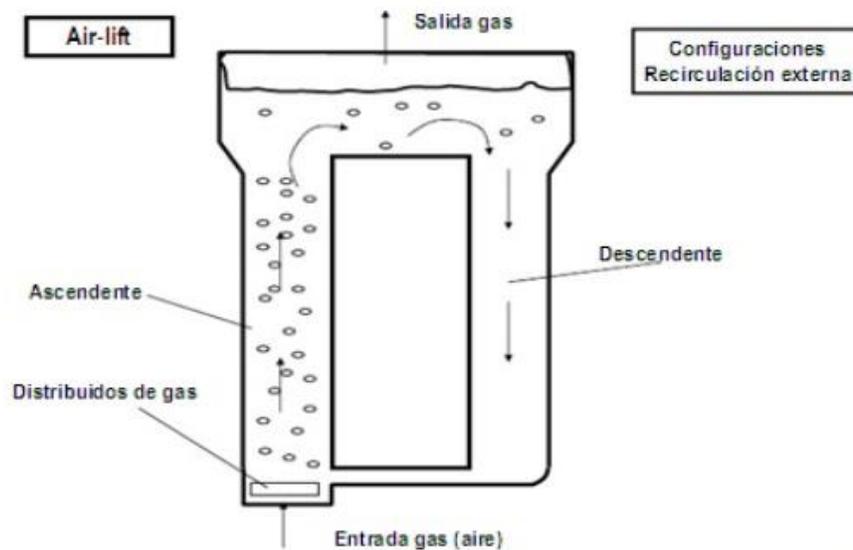


Figura 13. Reactor airlift. Tomado de:
<http://es.slideshare.net/ramon101191/unitarias>

En el interior del tanque de este biorreactor se distinguen cuatro zonas (Tabla 8) con una dirección de flujo y con una fluidodinámica concretas (Figura 14):



Tabla 8. Zonas con una dirección de flujo (Díaz, 2001).

Zona de elevación.	Sector donde el gas se dispersa produciendo una corriente ascendente que arrastra otras fases existentes en el reactor.
Zona exterior o corona.	Sector paralelo al anterior y que está conectado con este por la región superior e inferior del tanque. Las fases arrastradas por el ascenso del gas en la zona de elevación, son recirculadas en la corona con dirección descendente.
Zona superior.	También se la define como zona de inversión del flujo y es el sector en el que se produce la separación de la fase gaseosa del resto de fases del tanque, permitiendo así que las fases densas descendan por la corona, pudiendo haber recirculación de gas si existe arrastre, circunstancia que se produce si la velocidad del líquido en el descenso es mayor que la del gas de elevación.
Zona inferior.	Este sector se encuentra sobre la placa de inyección del gas y es otra zona de inversión de flujo donde conectan las corrientes de circulación de la corona con la de ascenso de la zona de elevación. De existir fase sólida es la única región del reactor donde se produce preferentemente la sedimentación.

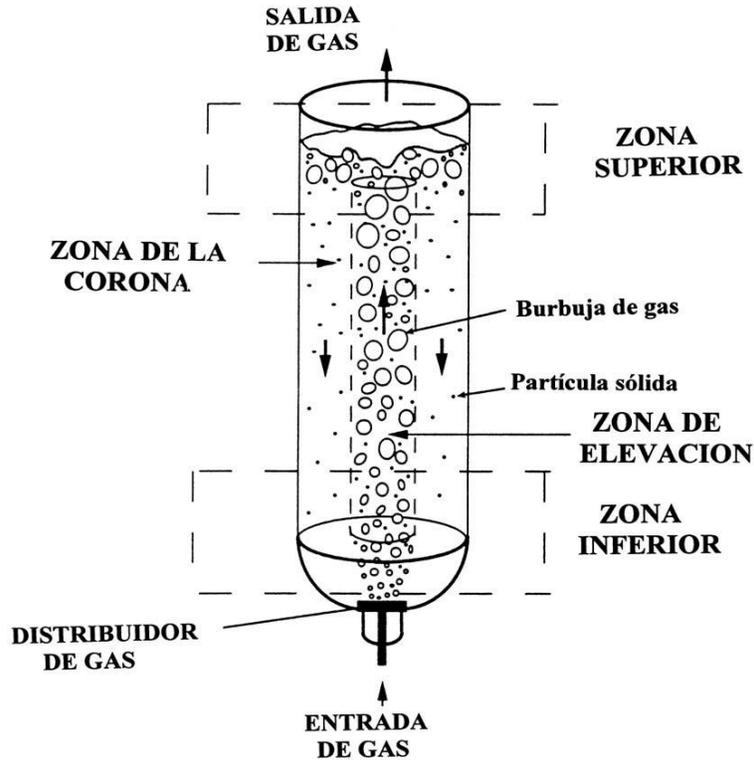


Figura 14. Zonas diferenciadas en un biorreactor airlift. Tomado de: Díaz, 2001.

Las ventajas de estos sistemas en comparación con los otros biorreactores agitados por fluidos, se presentan a continuación.

Tabla 9. Ventajas de los biorreactores airlift

El mezclado es más eficiente
Existen elevados coeficientes de difusión del gas.
Homogeneidad en el medio.
Pequeños esfuerzos cortantes.
Soporte con alta concentraciones de biomasa.
Elevada superficie de contacto.



Recuerda que para el diseño de este tipo de biorreactores debes considerar los siguientes factores relacionados con las **zonas con una dirección de flujo**:

- 1.** El **soporte** donde se desarrollará la película microbiana debe ser resistente a la abrasión, con capacidad tampón y gran superficie de contacto.
- 2.** La **temperatura** deberá ser controlada en función de la naturaleza del microorganismo, es decir, si se encuentra dentro del rango de los psicrófilos, mesófilos o termófilos. El aumento en la temperatura disminuye la actividad microbiana y produce una pérdida en la eficiencia del proceso.
- 3.** El **pH** del sistema dependerá de los requerimientos del microorganismo. Generalmente este parámetro tiene relación directa con el crecimiento de la biomasa en suspensión, de tal manera que, para favorecer su adecuado desarrollo y transformación del sustrato en el producto deseado, será indispensable su control, a través de dispositivos adecuados para dicho fin.
- 4.** A mayor tiempo de **residencia del gas dentro del biorreactor**, mayor será el tiempo de contacto entre el sustrato y los microorganismos, por lo tanto, la eficiencia del sistema será mejor.
- 5.** Al aumentar la **velocidad de flujo** se disminuye el tiempo de contacto entre el sustrato y la biomasa microbiana, disminuyendo la eficiencia del sistema.
- 6.** Generalmente, los **microorganismos** que se desarrollan en estos biorreactores requieren de fósforo, nitrógeno y azufre, que deben ser suministrados de acuerdo a sus necesidades.

Los biorreactores agitados por fluidos, son dispositivos cilíndricos, generalmente de acero inoxidable, vidrio o acrílico, en los que el mezclado se realiza a través de medios mecánicos (Figura 15).

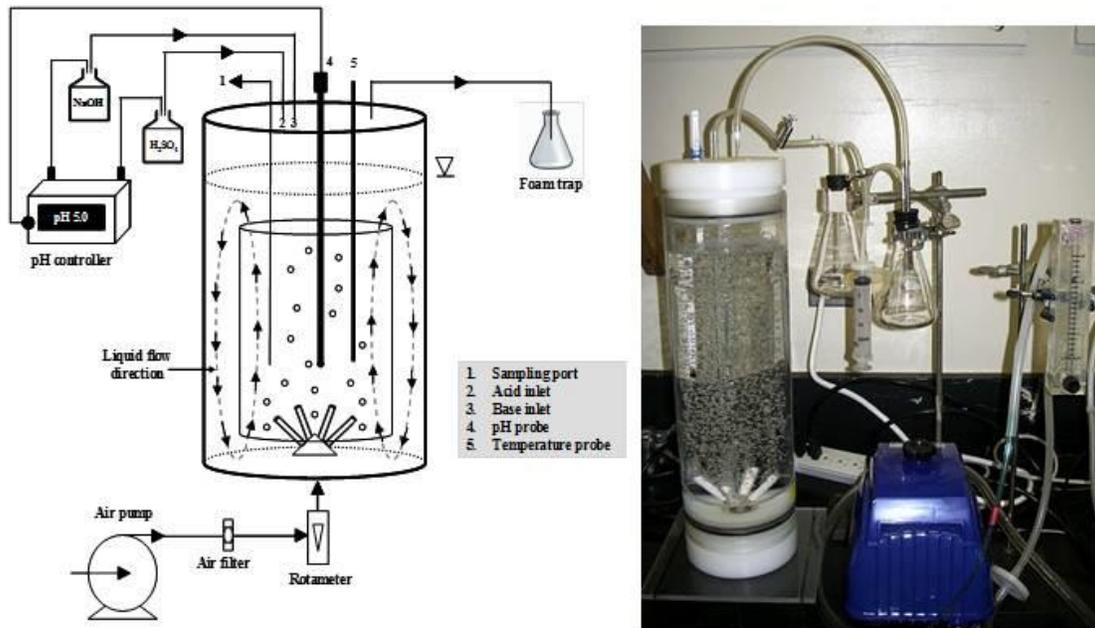


Figura 15. Biorreactor comercial airlift. Tomado de: <http://www2.hawaii.edu/~khanal/fungal/fungalfermentation.html>

El cuerpo de estos sistemas, en algunas ocasiones está recubierto con un aislamiento. Los principales componentes de un biorreactor comercial airlift, se enumeran a continuación:

- 1 Una chaqueta de alta eficiencia para el control de temperatura.
- 2 Unidades de control de operación (pH, espuma, oxígeno disuelto, temperatura).
- 3 Flujómetro
- 4 Medidores de oxígeno
- 5 Bombas peristálticas
- 6 Sistema de muestreo



El costo del sistema, dependerá del bioproceso a realizar en él, del material para su construcción, de los sistemas de control y monitoreo y de su capacidad (volumen de operación).

Después de haber revisado las características más importantes de un biorreactor agitado por fluidos, has adquirido los conocimientos necesarios para poder realizar una comparación con los anteriormente analizados, esto te permitirá tener las bases para el diseño que deberás de proponer al finalizar la unidad.

3.1.5 Biorreactores de membrana

Continuando con el estudio de esta unidad, se dará paso a los fermentadores o biorreactores de membrana, estos son ampliamente utilizados en diversos campos industriales sobre todo para aquellos que producen compuestos difícilmente de degradar. Ejemplo de esto es el aprovechamiento de un colorante a base de la cochinilla (*Dactylopius coccus*) que se utiliza en la industria textil, cosmética y alimentaria. A través de este insecto, se produce ácido carmínico, materia prima para la producción de colorantes naturales que van desde naranja hasta rojo azulado; mismo que se emplea para la producción de un famoso alimento para niños a base de queso fresco (Figura 16).



Figura 16. La cochinilla (*Dactylopius coccus*) y ejemplo de productos de la industria alimentaria que lo utilizan como colorante natural. Tomado de: <http://www.biodiversidadvirtual.org/insectarium/Dactylopius-coccus-img184386.html>; <http://www.huertasurbanas.com/2014/08/24/el-inocente-yogurt/>

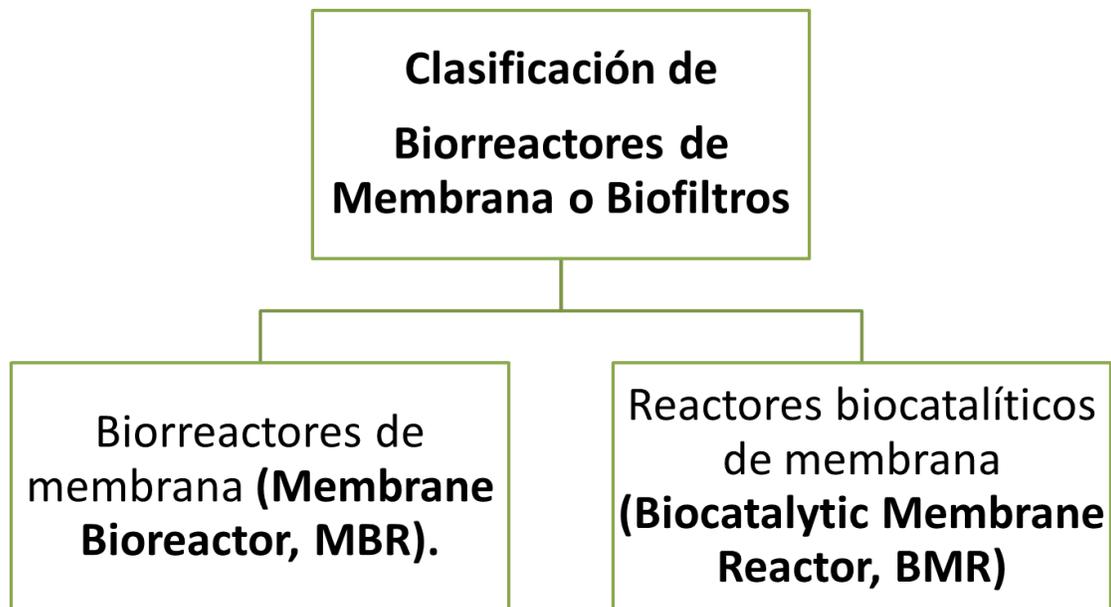
A pesar de la importancia del procesamiento de dicho insecto para la industria de los colorantes, el agua residual, generada en el proceso de



producción, presenta elevadas concentraciones de amonio, fosfatos y materia orgánica de lenta biodegradabilidad; lo que dificulta su tratamiento (Lopetegui, *et al.*, 2005).

Para disminuir la contaminación en este tipo de agua, se han implementado plantas de tratamiento de aguas, que además del tratamiento fisicoquímico convencional, ocupan un tratamiento biológico a base de biorreactores de membrana. En este caso particular, el sistema cuenta con una unidad en la que se lleva a cabo el metabolismo y eliminación de la materia orgánica gracias a la acción de los microorganismos libres; y otra unidad, donde se recibe el agua tratada. Ambas unidades previamente mencionadas, se separan por una membrana, que es la encargada de retener los sólidos en suspensión y los microorganismos.

Los **fermentadores o biorreactores de membrana** se clasifican, de acuerdo al funcionamiento que desempeña la membrana, en:





Biorreactores de membrana (MBR)

Los MBR se caracterizan porque la membrana únicamente contribuye al control del transporte de masa, es decir, no contribuye con la reacción y sólo representa un medio filtrante (Zuriaga-Agustí, 2010).

El principio de funcionamiento de estos biorreactores se basa en la separación de la materia sólida en suspensión y de la biomasa microbiana contenida en el medio de cultivo al aplicar presión diferencial entre ambos lados de la membrana (Figura 17), al tiempo que la fase líquida, que contiene al producto de la biotransformación, atraviesa la membrana. La diferencia de presión a aplicar depende del tamaño del poro y de la calidad de la membrana (Huber Technology, 2010).

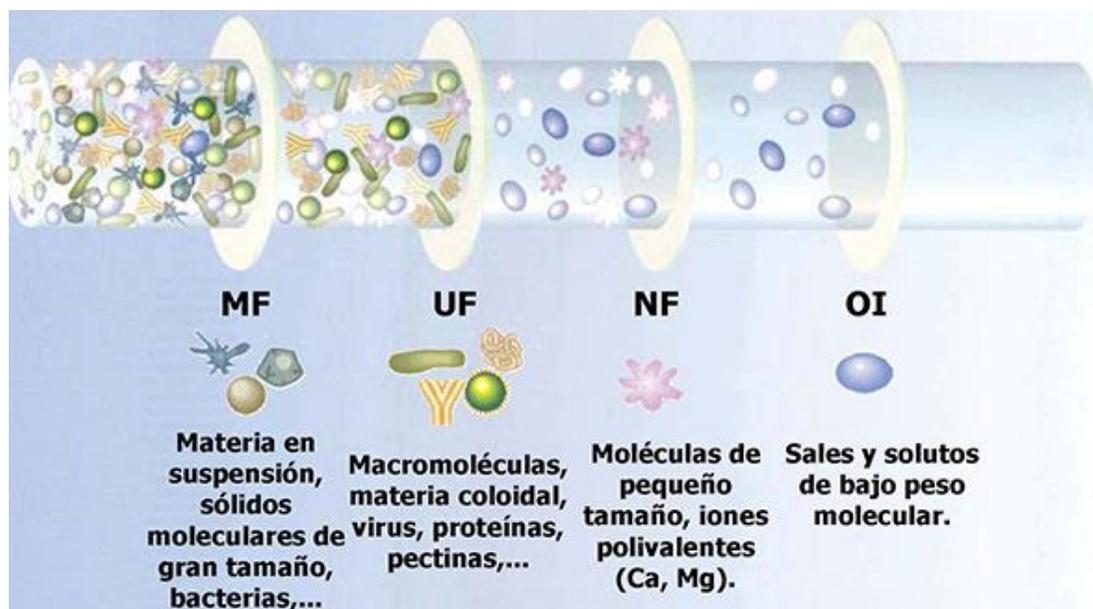


Figura 17. Simulación del funcionamiento de un biorreactor de membrana. Tomado de: <http://www.oxidine.net/productos/membranas/>

En función del mecanismo de contacto entre el microorganismo y el sustrato, se pueden clasificar en:



Tabla 10. Clasificación de Biorreactores de Membrana (Velasco Pérez & Solar González, 2011)

TIPO DE BIORREACTOR	CARACTERÍSTICAS	SE DIVIDE
De contacto directo	Son aquellos en los que el microorganismo y el sustrato están en contacto directo y la membrana únicamente permite el paso de los productos de la biotransformación.	Biorreactores de membrana sumergida: la membrana está sumergida en el biorreactor permitiendo la separación física mediante presurización del sistema. El mantenimiento de su función se realiza a través de retrolavados con agua y aire; o bien, con soluciones químicas especializadas para este fin. Debido a que la velocidad de flujo es baja, la compactación es menor y por tanto, la frecuencia de limpieza también lo es. Sin embargo, los costos de aireación y de la inversión inicial, son altos (Figura 18).
		Biorreactores de membrana externa: el sustrato sale de la unidad biológica, es llevado a la membrana, y recirculado nuevamente al biorreactor. Debido a que la velocidad de flujo es alta, la compactación es mayor y por tanto, la frecuencia de limpieza también lo es; a pesar de que los costos de bombeo y de operación son elevados; los de aireación y la inversión inicial, son bajos (Figura 19).
De membrana de difusión	Son aquellos en los que el sustrato y el microorganismo se encuentran separados por una membrana, la cual permite el paso de los nutrientes, hasta el compartimiento del microorganismo, por un proceso de difusión pasiva.	Estos no se subdividen en otros tipos.

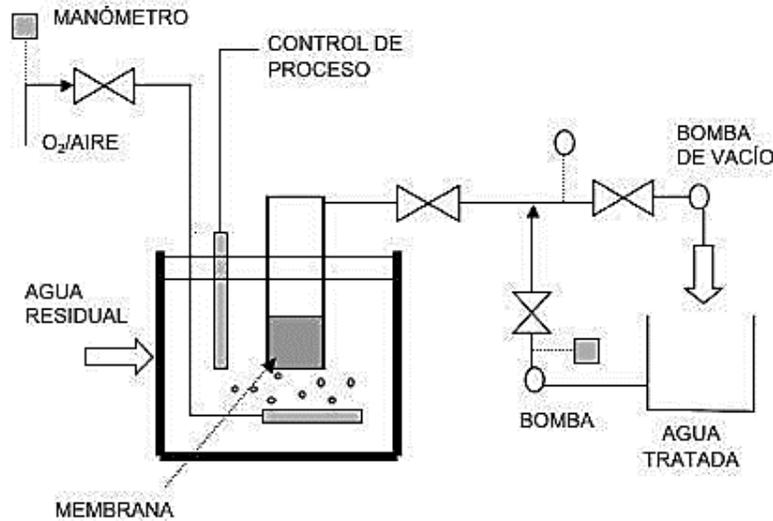


Figura 18. Esquema de un biorreactor de membrana sumergida. Tomado de: <https://www.uv.mx/cienciahombre/revistae/vol24num3/articulos/membrana/>

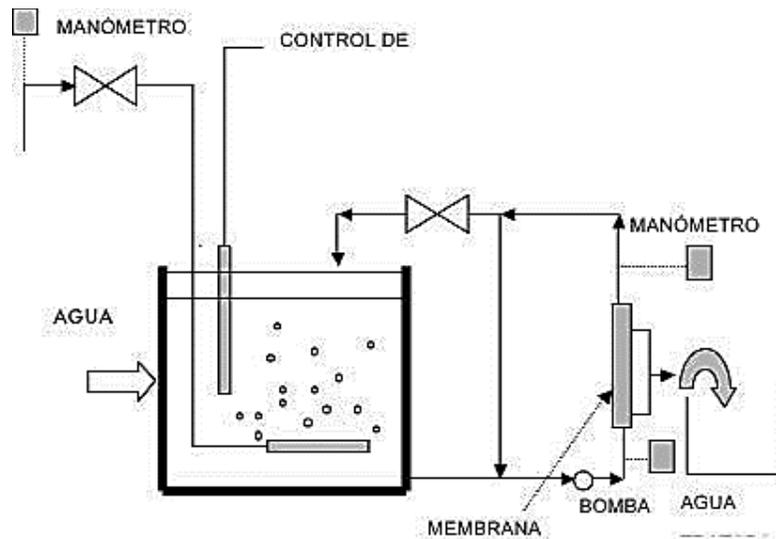


Figura 19. Esquema de un biorreactor de membrana externa. Tomado de: <https://www.uv.mx/cienciahombre/revistae/vol24num3/articulos/membrana/>

Finalmente, en los BMR la membrana trabaja como un sistema de catálisis/separación, es decir, la biotransformación ocurre al nivel de la membrana cuando los microorganismos son inmovilizados en ella.



Los biorreactores de membrana, generalmente, se componen de dos partes: el reactor biológico y el módulo de membrana que sirve como sistema de filtración.

Dichas membranas pueden ser planas, tubulares, de disco rotatorio o de fibra hueca. Se fabrican en:

- Materiales orgánicos a base de polímeros o copolímeros como: polisulfona, polietersulfona, polietileno, entre otros.
- Materiales inorgánicos, como las cerámicas.

De acuerdo al Centro Canario del Agua (2003), para que este tipo de biorreactores tengan una alta eficiencia, las membranas deben poseer las siguientes características:

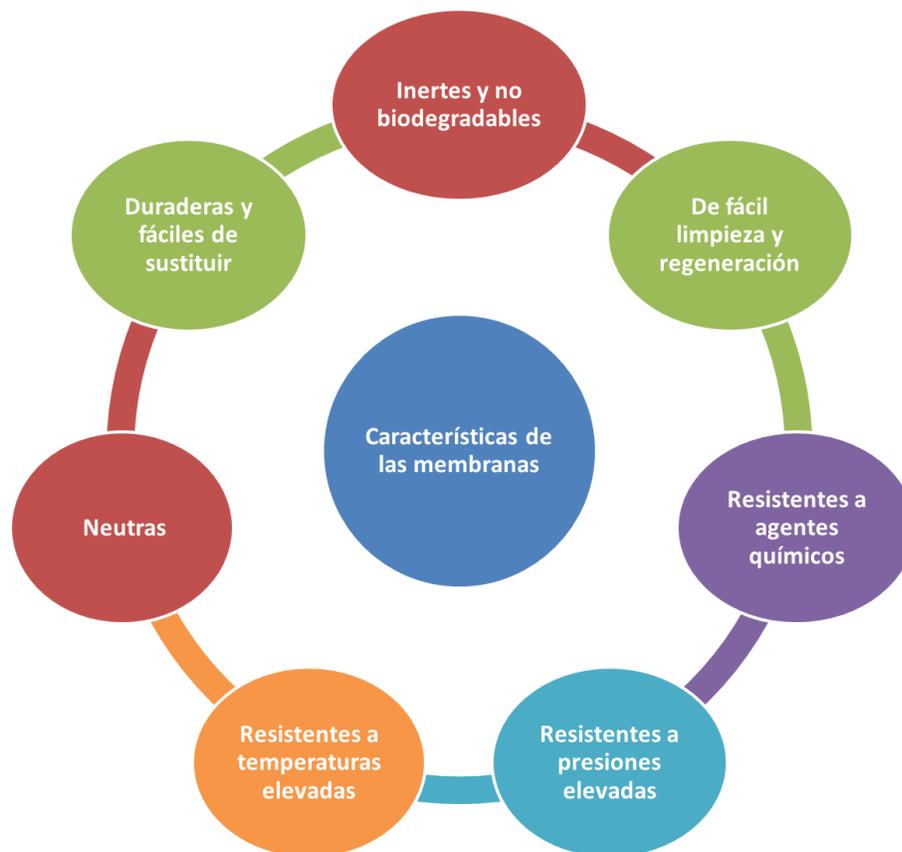


Figura 20. Principales características de las

De acuerdo a lo previamente estudiado los biorreactores de membrana de contacto directo, se clasifican en: biorreactores de membrana sumergida y



en biorreactores de membrana externa; los cuales varían en su diseño y operación. En la siguiente tabla (Tabla 11) se comparan ambas configuraciones:

Tabla 11. Comparación entre MRB sumergida y en MRB externa (Centro Canario del Agua, 2003).

Con membrana sumergida	Con membrana externa
Coste de aireación altos (90%)	Costes de aireación bajos (20%)
Costes de bombeo muy bajos	Costes de bombeo altos (60-80%)
Flujo bajo (compactación menor)	Flujo (mayor compactación)
Frecuencia de limpieza baja	Requiere mayor frecuencia de limpieza
Costes de operación menores	Costes de operación elevados

Inversión inicial fuerte

Inversión inicial menor

Finalmente, considera que la aparición de membranas poliméricas de UF (ultrafiltración), menos costosas y más resistentes junto con los requerimientos de presiones menores y la obtención de un flujo permeado mayor ha potenciado el uso a nivel mundial de los fermentadores de membrana sumergidos (Centro Canario del Agua, 2003).

Es importante reconocer que después de la revisión de este subtema te has introducido a uno de los biorreactores mayormente utilizados por presentar una de las alternativas más viables para el reaprovechamiento y tratamientos de aguas grises.

3.1.6 Fotobiorreactores

Hoy en día se están desarrollando tecnologías que permiten combatir o minimizar el impacto de las actividades humanas en el ambiente. A nivel mundial se habla acerca de los estragos del Cambio climático. Seguramente habrás escuchado que uno de los factores que lo propicia es el uso desmedido y la quema de los combustibles fósiles, en otras palabras,



se está emitiendo al ambiente sustancias como el dióxido de carbono o los óxidos de azufre y de nitrógeno, que alteran los ciclos naturales del planeta, lo que ha causado: el incremento en el número de huracanes, el nivel del mar, las inundaciones y los incendios forestales, además, se están extinguiendo una gran cantidad de especies de flora y fauna, incluso, los humanos, tampoco se están adaptando a estos cambios. Aunado a esto, se requiere buscar alternativas ante el inminente agotamiento de los recursos fósiles, ya que el consumo energético, marca el grado de desarrollo de un país (Figura 21).



Figura 21. Combustibles fósiles.

Tomado de:
<https://nuestrosrecursosnaturales.wordpress.com/tag/combustibles-fosiles/>

Una forma de dar respuesta a este problema, es a través de la producción y uso de combustibles alternos, tales como el biodiesel. Este combustible, a diferencia de los que provienen de los combustibles fósiles, es biodegradable y no genera óxidos de nitrógeno y azufre durante su combustión, por lo que puede considerarse como amigable con el ambiente.

Biodiesel

Es un biocarburante que se produce a partir de grasas y aceites provenientes de fuentes vegetales (semillas oleaginosas) y animales (Agencia Andaluza de la Energía, 2016).



A pesar de ello, existen restricciones para su producción, ya que, al utilizarse semillas oleaginosas, como la soya y el maíz, se le considera como una amenaza para cubrir las necesidades básicas de alimentación de la población, y es aquí donde entra la biotecnología.

Actualmente se están cultivando organismos productores de compuestos que se pueden transformar en combustibles.

Un ejemplo de ello son las microalgas oleaginosas, (como las del género *Phaeodactylum*, *Tetraselmis*, *Chlorella* o *Isochrysis*), cuyos aceites pueden convertirse, por métodos químicos convencionales, en biodiesel (Figura 22). Para ello se requiere de sistemas especiales, denominados fotobiorreactores, que mantienen las condiciones adecuadas para favorecer la fotosíntesis en los microorganismos, células o tejidos; con el consecuente incremento de la biomasa.

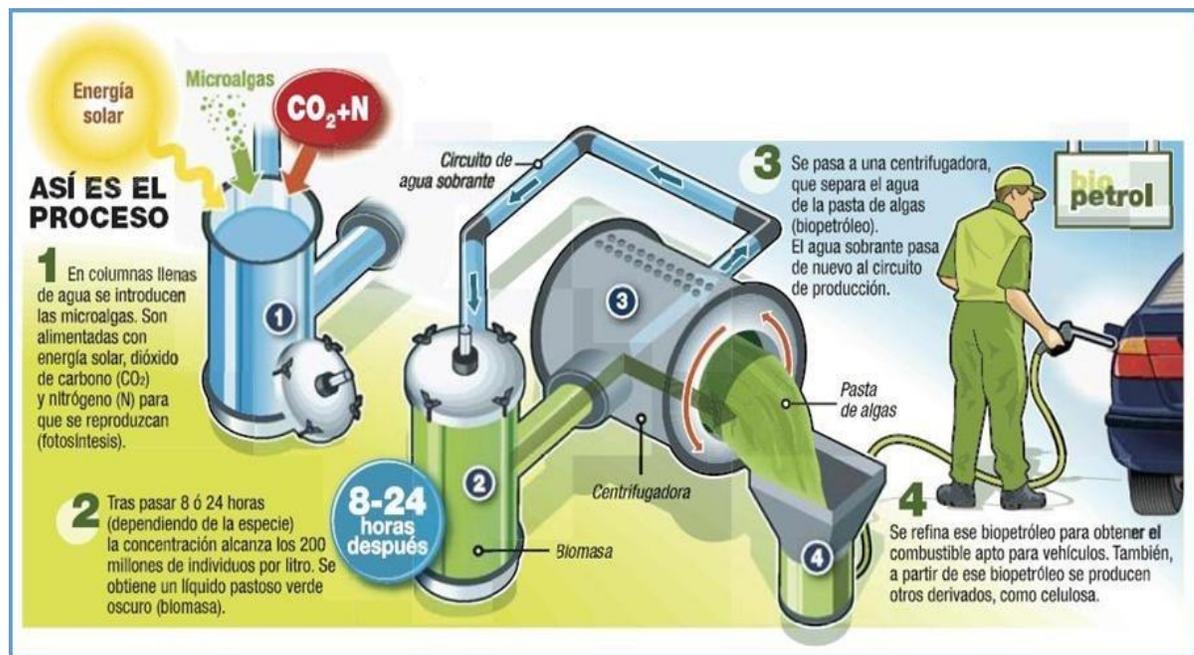


Figura 22. Proceso de extracción de aceite de las microalgas mediante la utilización de un Fotobiorreactor. Tomado de:

https://bioreactorcrc.files.wordpress.com/2011/05/clip_image044.jpg.

Por lo tanto, el rol que desempeña el biotecnólogo en esta área es muy importante, ya que de él depende el adecuado diseño e implementación de estos sistemas; por lo que, a través del desarrollo del tema, comprenderás las principales características, clasificación y materiales de construcción de dichos biorreactores.



Fotobiorreactor

Un fotobiorreactor es un dispositivo que proporciona las condiciones necesarias para que los microorganismos, ahí dispuestos, desarrollen de manera adecuada el proceso de la fotosíntesis, a través de la fijación de dióxido de carbono (CO_2), que permitirá que se desarrollen y reproduzcan eficaz y rápidamente, de tal manera que generen el producto de interés que deseamos obtener. Estos biorreactores trabajan en modo continuo, semicontinuo o por lotes (Fernández-Sevilla, 2014).

Existen diversos tipos de fotobiorreactores, entre los que encontramos:

A) **Estanques abiertos o raceways:** estos se conocen comúnmente como lagos, lagunas o estanques, ya sean naturales o artificiales (Figura 23). A pesar de ser de fácil manejo y de requerir de poca capacidad humana para su manteniendo, tienen como desventajas que las células podrían no disponer de la cantidad adecuada de luz, ya que esta varía con la región, el clima y las estaciones del año; la disponibilidad de CO_2 es variable, debido a que está en función de la difusión del CO_2 atmosférico en el agua; existe mayor evapotranspiración y posibilidades de contaminación por agentes externos; el mezclado del medio de cultivo es ineficiente; existen problemas con el control de la temperatura; y se requieren de grandes extensiones de territorio para su implementación.



Figura 23. Fotobiorreactor de estanque abierto. Tomado de:
<https://biotechmind.wordpress.com/2014/10/24/bioethanol-biocombustibles-biodiesel-biofuel/abierto/>

B) **Tubulares:** están formados por tubos conectados a un sistema de instalaciones, por las que se suministra CO_2 y nutrientes, o bien, pueden estar en configuración de serpentín tubular dispuesto de manera horizontal, vertical o inclinada. Presentan un buen mezclado y difusión de CO_2 , debido a la recirculación del medio de cultivo (Figura 24).



Figura 24. Fotobiorreactor tubular. Tomado de:
<http://www.algaenergy.es/galeria/>

C) **De columna de burbujeo:** están formados por columnas verticales cilíndricas, elaboradas en vidrio o polímeros transparentes. El CO_2 se introduce por la parte inferior del sistema en condición de flujo turbulento, es decir, permite la mezcla en forma caótica. La fuente de luz puede ser natural (sol) o artificial (Figura 25).



Figura 25. Fotobiorreactor de columna. Tomado de:
[http://aquafeed.co/laboratorio-marino-presenta-una-elegante-
%E2%80%98columna-de-burbujas%E2%80%99-de-microalgas/](http://aquafeed.co/laboratorio-marino-presenta-una-elegante-%E2%80%98columna-de-burbujas%E2%80%99-de-microalgas/)

Los fotobiorreactores están constituidos por varios elementos que se incluyen en la figura 26.



Figura 26. Elementos que constituyen un Fotobiorreactor.

Recuerda, que al igual que en otro tipo de reactores, para el diseño debes considerar diversos factores, los cuales se mencionan a continuación:



Temperatura	<ul style="list-style-type: none">• Está dada por la temperatura óptima de crecimiento del microorganismo, que suele estar entre 16.5-26.5°C.
pH	<ul style="list-style-type: none">• Se determina por el pH óptimo de crecimiento del microorganismo. Generalmente, las microalgas se desarrollan adecuadamente en un rango de pH de 7 a 9.
Intensidad lumínica (lux)	<ul style="list-style-type: none">• Permite controlar el proceso de la fotosíntesis, y dependerá del volumen del biorreactor y de la densidad del medio. El óptimo suele estar entre 2,500 y 5,000 luxes
Fotoperiodo	<ul style="list-style-type: none">• Corresponden a los ciclos de luz y oscuridad a los que se somete el microorganismo, indispensables para su metabolismo. En las microalgas este suele ser de 16 horas de luz/8 horas de oscuridad.
Especie cultivada	<ul style="list-style-type: none">• Define la tasa de crecimiento y reproducción, y, por lo tanto, el volumen del biorreactor.
Nutrientes	<ul style="list-style-type: none">• Deben ser ajustados de acuerdo a la especie.
Aireación	<ul style="list-style-type: none">• Debe ser controlada para evitar la inhibición por oxígeno, hecho que se ve reflejado en la disminución del crecimiento.
Tipo de agua	<ul style="list-style-type: none">• Está dada por los requerimientos del microorganismo, la cual puede ser: dulce, salada, blanda o dura.
Mezclado	<ul style="list-style-type: none">• Favorece la homogeneización del medio, es decir, impide la sedimentación de los microorganismos y el contacto adecuado con la luz y con los nutrientes del medio.

Un fotobiorreactor proporciona las condiciones necesarias para que los microorganismos ahí dispuestos, desarrollen de manera adecuada sus procesos metabólicos, a través de la fijación de dióxido de carbono (CO₂) y del establecimiento de un fotoperiodo, que permitirá la obtención del producto de interés.

Existen diversos fotobiorreactores que permiten la reproducción de dichos organismos. Se clasifican en sistemas abiertos y cerrados.



1. Sistemas abiertos

Son aquellos que se encuentran expuestos al ambiente, por lo que su eficiencia es afectada por múltiples factores, incidiendo principalmente los cambios climáticos; además, presentan una mayor probabilidad de contaminación por agentes externos. En este grupo se encuentran los estanques naturales o artificiales, los tanques circulares y los raceways, siendo estos últimos, los más utilizados para el cultivo de microalgas.

Los raceways (Figura 27) se suelen construir en forma ovalada, a partir de materiales resistentes al efecto de la presión hidrostática, como: hormigón, tablero marino, fibra de vidrio y PVC. Para favorecer la homogeneización del medio, la suspensión de las microalgas, la aireación y la agitación, se suelen usar dispositivos rotativos, tales como los agitadores de paleta, o bien, se logra a través de la recirculación del medio con el uso de bombas. Estos sistemas tienen las siguientes características:

- Son económicos.
- Fáciles de limpiar después del cultivo.
- Buenos para el cultivo masivo de microalgas.
- Fácil contaminación.

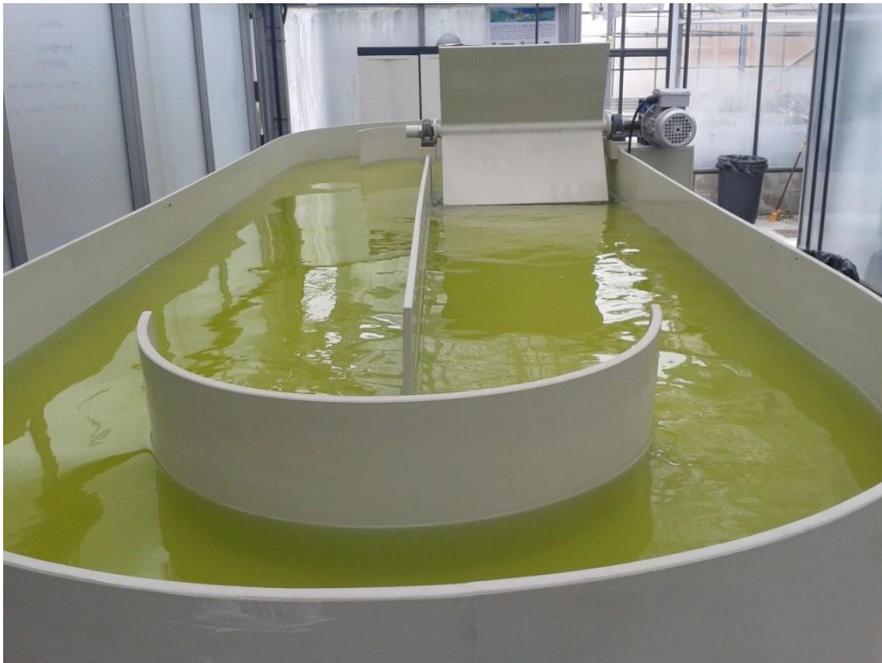


Figura 27. Raceway para cultivo de microalgas. Tomado de: <http://www.omega3alga.es/proceso/>



2. Sistemas cerrados o PBR's

Se caracterizan por ser dispositivos aislados del exterior, que permiten el cultivo de microorganismos bajo condiciones controladas. Se construyen en materiales con alta fuerza mecánica, carentes de toxicidad, resistentes al desgaste, con estabilidad química, de fácil limpieza y bajo costo.

Los tubos de polipropileno son un ejemplo de materiales de bajo precio empleados comúnmente para la construcción de este tipo de fotobiorreactores, sin embargo, presentan como desventajas, que pierden la transparencia muy rápidamente y que muestran serias limitaciones en cuanto al bioensuciamiento y a la fuerza mecánica. El cristal podría ser un material excelente (alta transparencia, estabilidad química y durabilidad), sin embargo, son altos los gastos de instalación; además de su fragilidad. Las bolsas de polietileno también son usadas, son de bajo costo, de alta transparencia, y de buena esterilidad (López *et al.*, 2009).

En este grupo de sistemas se encuentran los fotobiorreactores tubulares, los de capa plana y las columnas verticales o de burbujeo.

Los fotobiorreactores tubulares se construyen con tubos de plástico o vidrio, los cuales se disponen en forma horizontal, vertical, cónica, inclinada, en serie o en paralelo.

Los fotobiorreactores de capa plana se construyen en PVC transparente o en vidrio. Se utilizan ampliamente a nivel laboratorio ya que permiten estudiar fácilmente la influencia de la iluminación en la eficiencia de producción de microalgas (Figura 28).



Figura 28. Fotobiorreactor de capa plana. Tomado de:
<https://sciunt.wordpress.com/category/microalgas/>

Las columnas verticales o fotobiorreactores de columna de burbujeo, se construyen en polietileno o vidrio. Pueden colocarse en estructuras móviles que permitan el uso de la energía solar. El mezclado, la homogeneización del medio y la suspensión de las microalgas; se logra a través de la inyección de aire (airlift).

La elección y diseño del fotobiorreactor a utilizar para el cultivo de microorganismos, se basa en los requerimientos de luz, nutricionales, pH, temperatura, de mezclado, dispersión de CO_2 y O_2 , entre otros. A demás de ello, se suele considerar el gasto económico relacionado con su implementación y mantenimiento, por ello, actualmente, los raceways son los sistemas más empleados para su producción ya que suelen generar de 5 a 10 gramos de biomasa (base seca) por metro cuadrado de superficie por día.

La revisión de los fotobiorreactores te permitirá reconocer la importancia de la utilización de una gran diversidad de microorganismos, ya que como hemos visto son la alternativa más viable para sustituir los combustibles de origen fósil, asimismo son fáciles de mantener e instalar a diferentes escalas para su aprovechamiento.



3.1.7 Biofermentadores sólidos

Para comprender de forma más fácil lo que es un fermentador sólido, podemos utilizar el cultivo de champiñones; para esto, se debe contar con un sitio oscuro, fresco y con buena humedad. Se ocupan cajas pequeñas en las que se coloca estiércol natural (de caballo, mula o burro) o artificial (formado por paja de trigo en pequeños tamaños, gallinaza (excremento de gallina), urea (rica en nitrógeno) y otros nutrientes). Una vez preparadas las cajas, se colocan esporas o bien, se desprende el sombrero de otro hongo, se corta en pedazos y se sitúa en el excremento (Figura 29).



Figura 29. Cultivo de champiñones. Tomado de: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Hundreds_of_mushrooms_\(10843702823\).jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Hundreds_of_mushrooms_(10843702823).jpg)

Lo antes citado, es un ejemplo de fermentación en estado sólido, es decir, es un proceso fermentativo en el cual los organismos involucrados (champiñones) crecen sobre una matriz sólida (excremento natural o artificial) en escasez o ausencia de agua libre. El sustrato debe contener sólo la humedad y los nutrientes necesarios para favorecer el crecimiento y la actividad metabólica de los organismos. Otro ejemplo cotidiano, es cuando crece moho en las paredes con humedad o en las frutas cuando están en descomposición.



Existen múltiples ejemplos de aplicación de la fermentación en estado sólido, por lo que, a lo largo del desarrollo del tema, comprenderás sus características, así como, los materiales y costos de su implementación.

En los últimos años, la investigación y desarrollo de fermentadores en medio sólido han tomado gran auge, entendiéndose por estos, a aquellos dispositivos en los que los microorganismos crecen sobre un sustrato con bajos o nulos niveles de humedad.

Los más estudiados hasta este momento son los de bandeja, los de tambor rotatorio, los de cama empacada y los de columna de lecho fijo.

Los biorreactores en columna fueron desarrollados en 1975, por un grupo de investigadores en Francia (Figura 30). Están constituidos por columnas verticales de pequeño tamaño, elaboradas a base de vidrio, que se empaquetan con un medio sólido previamente inoculado.

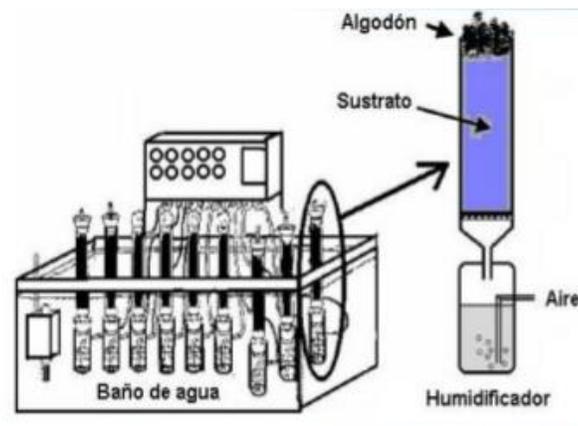


Figura 30. Fermentador sólido de columna. Tomado de <http://es.slideshare.net/marqelypootlopez/reactor-solido-y-enzima>

Estos fermentadores disponen de (Figura 31):

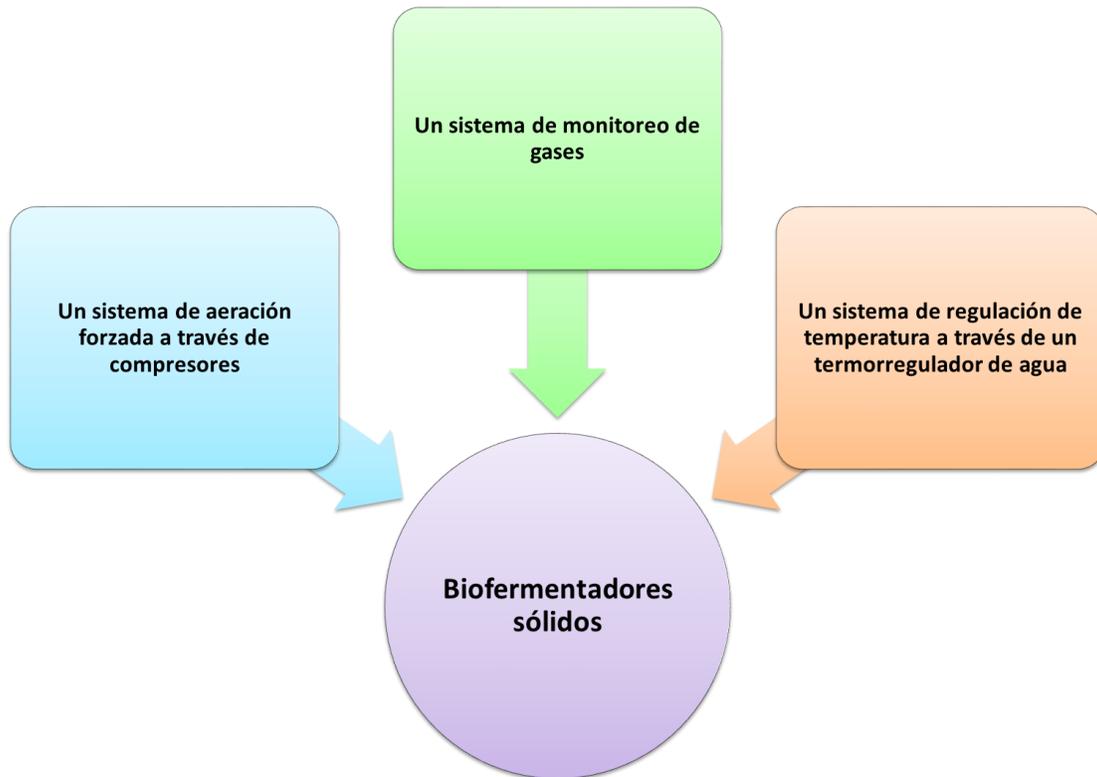


Figura 31. Componentes de los fermentadores sólidos.

Los **biorreactores de columna estéril** se basan en el diseño de los biorreactores en columna (Figura 32). Difieren en que la toma de muestra de la columna se puede realizar en forma aséptica a través de la tapa superior del sistema, dotada de un dispositivo de flama.

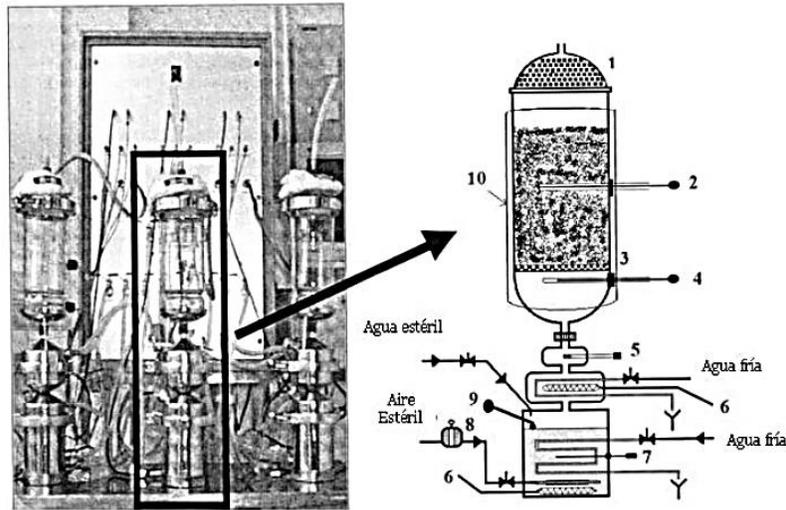


Figura 32. Fermentador sólido de columna estéril. (1) tapa de calefacción, (2) termómetro, (3) tamiz de acero, (4) medidor de temperatura del aire en la entrada, (5) medidor de humedad relativa, (6) resistencia, (7) medidor de temperatura de agua, (8) medidor de flujo másico, (9) medidor de nivel, (10) chaqueta aislante. Tomado de: *Ruíz-Leza et al., 2007.*

Estos fermentadores están compuestos por (Figura 33):

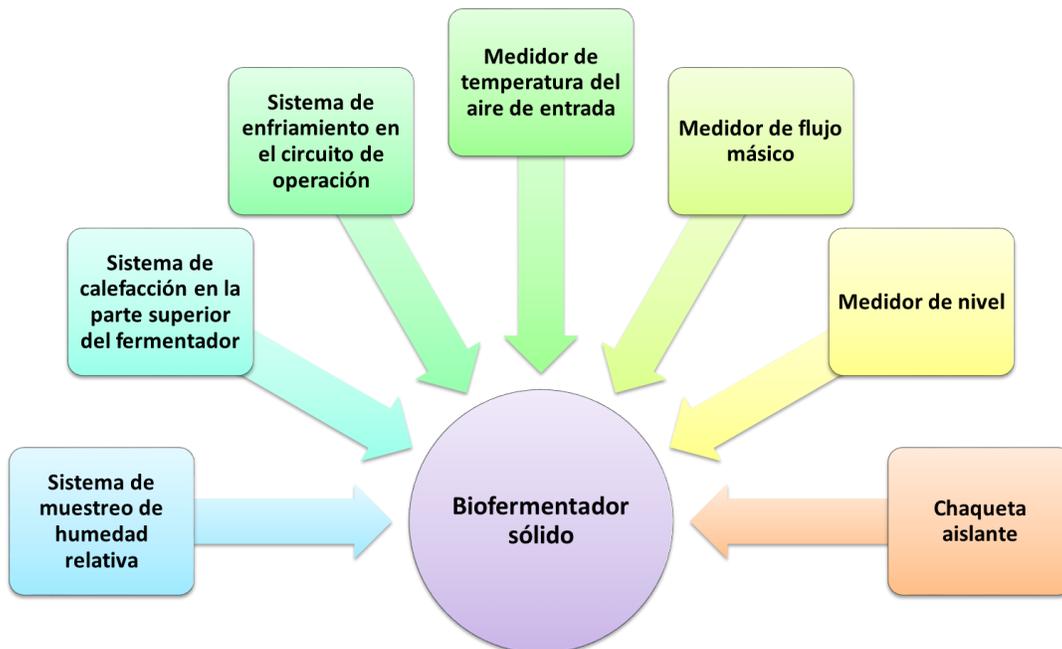


Figura 33. Componentes un biorreactor de columna estéril.



Los fermentadores de tambor horizontal o de tambor rotatorio (Figura 34) están constituidos por un contenedor cilíndrico rotatorio, de giro lento, perforado o con paletas, que permiten una mejor difusión de oxígeno en el medio y una agitación constante del sustrato sólido. Sin embargo, dicha agitación puede ser dañina debido a fenómenos de abrasión.

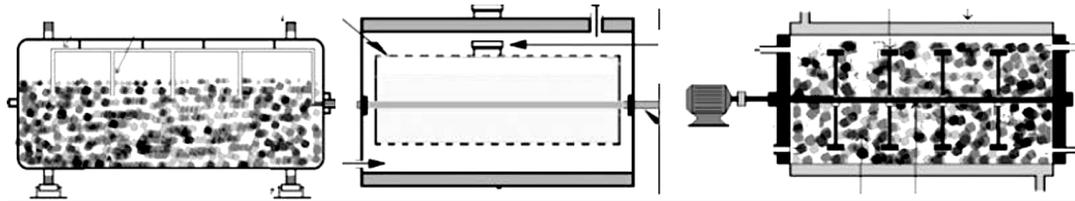


Figura 34. Componentes un biorreactor de columna estéril. Tomado de: *Díaz, 2009*.

Los biorreactores Zymotis están formados por platos verticales fijos. Disponen de un sistema de transferencia de calor interno y uno de aireación temporizada en el fondo del sistema. El sustrato sólido inoculado se coloca entre cada plato, manteniéndose estático durante la fermentación (Figura 35).

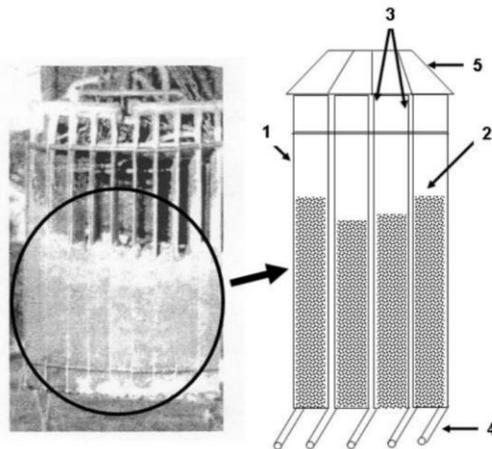


Figura 35. Fermentador sólido Zymotis. (1) Platos verticales intercambiadores de calor, (2) cama de sustrato, (3) entrada de agua, (4) salida de agua, (5) termostato. Tomado de: *Ruíz-Leza et al., 2007*.

El fermentador Growtek (Figura 36) está formado por un contenedor cilíndrico y un tubo externo de policarbonato pegado a la base con una



inclinación de 15° con respecto a la vertical. Tanto la tapa del cuerpo del reactor como la del tubo externo están fabricadas en polipropileno. Dentro del biorreactor, se dispone una tela de fibra de vidrio, contenida en un recipiente de polipropileno, que sirve de sostén para el sustrato. Este fermentador tiene como desventajas que no cuenta con sistemas de control de la temperatura, ni de toma de muestras.



Figura 36. Fermentador sólido Growtek. Tomado de:
<http://www.amazon.com/Bel-Art-Scienceware-389810000-Polycarbonate-Diameter/dp/B002VBW996>

En los biorreactores para proceso continuo, la alimentación y agitación de los sustratos sólidos inoculados se realiza a través de tornillo sin fin. Estos fermentadores se caracterizan por requerir menores tiempos de retención, buenas condiciones de asepsia y heterogeneidad en la distribución de temperatura.

El **fermentador de columna-charola o fermentador de bandeja** (Figura 37) está formado por un contenedor cilíndrico en cuyo interior se encuentran charolas perforadas en las que se encuentra el sólido inoculado. Dispone de:

1. **Sistema de burbujeo** que suministra oxígeno al medio.
2. **Sistema de regulación de temperatura** a través de una chaqueta de enfriamiento o calentamiento.

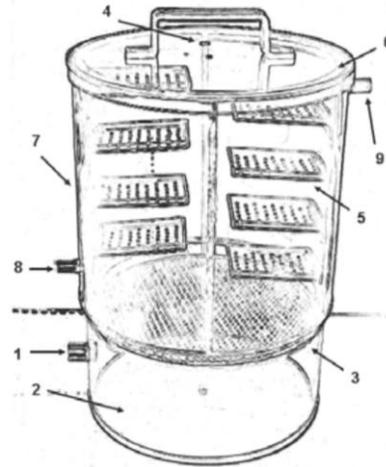


Figura 37. Fermentador sólido de charola. (1) Entrada de aire estéril, (2) entrada de agua estéril, (3) distribuidor de aire, (4) entrada para el termómetro, (5) charola, (6) chaqueta para el control de temperatura, (7) columna de acrílico, (8) entrada de agua, (9) salida de agua. Tomado de: *Ruíz-Leza, et al., 2007*

Los **fermentadores de lecho fluidizado** operan en régimen continuo. El cuerpo del reactor se llena por el medio sólido a fermentar. Dispone de una bomba a través de la cual se airea por flujo forzado, promoviendo a la vez, la agitación (Figura 38).

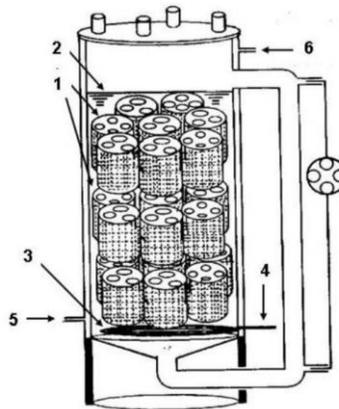


Figura 38. Fermentador sólido de lecho fluidizado utilizando loofa como soporte. (1) Camas de esponja de loofa, (2) medio de cultivo, (3) difusor de aire, (4) entrada de aire, (5) entrada de agua, (6) salida de agua. Tomado de: *Ruíz-Leza, et al., 2007*

El **biorreactor Biocon** se basa en el diseño de un fermentador de charola. Se diferencian en que en el sistema Biocon las charolas, previamente selladas, se colocan una sobre la otra formando torres unidas por un eje



central. El mezclado se realiza a través de un brazo que permite la rotación axial. Este tipo de biorreactor dispone de los siguientes elementos (Figura 39):



Figura 39. Elemento que posee un biorreactor Biocon.

Tal como se estudió en el subtema anterior, un fermentador en medio sólido es un dispositivo en el que los microorganismos crecen sobre un sustrato con bajos o nulos niveles de humedad. Existen diversas configuraciones de este tipo de sistemas. El siguiente cuadro, muestras las ventajas y desventajas entre ellos:



Tabla 12. Ventajas y desventajas de diversos fermentadores sólidos (Ruíz-Leza, *et al*, 2007).

Biorreactor	Ventajas	Desventajas
Escala laboratorio		
Columna	Económico, fácil montaje, monitoreo y control humedad, temperatura, biomasa y CO ₂ . Conexión en forma continua de varias columnas.	Canales preferenciales de O ₂ , dificultad en la toma de muestra y problemas en la eliminación de calor.
Columna estéril	Control de humedad y temperatura. Sistema de esterilización previo inoculación y toma de muestra.	Formación de gradientes de concentración de O ₂ y nutrientes.
Tambor horizontal	Mayor aireación y mezclado del sustrato. Existen varios diseños con modificaciones que mejoran la remoción del calor.	Daño de estructura micelial. Dificultad en el control de temperatura y humedad. Poco volumen utilizado en el tambor.
Zymotis	Mejor transferencia de calor.	Problemas de asepsia en el proceso. Mayor compactación de la cama de sustrato
Growtek	Facilidad en la toma de muestra. Mayor contacto entre el medio de cultivo y el soporte sólido. Menor acumulación de calor en la cama de sustrato.	No cuenta con un sistema de aireación. Sólo se pueden manejar una sola carga de 400 mL de medio líquido por fermentación.



Tabla 12. Ventajas y desventajas de diversos fermentadores sólidos (*continuación*).

Biorreactor	Ventajas	Desventajas
Proceso continuo	Menor tiempo de residencia. Mejor mezclado y crecimiento fúngico. Mayor asepsia.	Transferencia no homogénea de calor. Aglomeración de células por rompimiento Micelial.
Columna-charola	Económico. Alta transferencia de O ₂ y aireación. Mayor transferencia de nutrientes. Fácil remoción de temperaturas elevadas.	Primer Prototipo. Optimizar la cantidad y tamaño de charolas en el volumen del cilindro.
Escala piloto y/o industrial		
Bicon	Automatizado en el control de las variables de estudio del crecimiento microbiano. Altos niveles de asepsia. Equipo compacto.	Dificultad en la toma de muestra. Rápida generación de calor exotérmico por crecimiento microbiano.
Lecho fluidizado	Operación de forma continua. Menor aglomeración del sustrato. Incremento en la transferencia de O ₂ y humedad. Variedad de configuraciones de soportes.	Formación de altos esfuerzos cortantes que pueden afectar al microorganismos y rendimiento del producto.

Como puede apreciarse en el cuadro anterior, un parámetro importante que determina la factibilidad del proceso de fermentación en medio sólido es el tipo de sustrato empleado.



De acuerdo a Díaz (2009), los materiales sólidos, utilizados como sustrato, se clasifican en:

- a) **Materiales inertes.** Son aquellos que únicamente actúan como soporte físico para el anclaje de los microorganismos, por ejemplo, la espuma de poliuretano. Antes de su uso, estos materiales se impregnan con una disolución de nutrientes.
- b) **Materiales no inertes.** Son aquellos que funcionan como soporte y como medio de nutrientes para los microorganismos. En algunas ocasiones, este tipo de materiales se someten a un pretratamiento para que sus componentes, sean más asimilables por los organismos fijos en ellos. Se suelen dividir en tres grandes grupos:
 - Residuos con fibra de alta digestibilidad: como la pulpa de cítricos, el salvado de gluten de maíz, el residuo de cebada, etc.
 - Residuos con fibra de baja digestibilidad: como el bagazo de caña de azúcar, los cereales, el maíz, la paja de soya, la cáscara de algodón, la cáscara de soya, la cascara de cacahuate, el orujo de uva, etc.
 - Los salvados: a los que pertenecen el arroz, los cacahuates, la soya y el algodón.

Después de analizar este subtema, has adquirido los elementos necesarios para realizar una propuesta de alguno de estos biorreactores, siempre atendiendo la selección adecuada del sustrato ya que esto es fundamental, y que de él depende que el bioproceso se efectúe eficientemente. Los factores que se consideran para este fin son como hemos visto son: la porosidad, la composición química, el tamaño de partícula, la disponibilidad y el precio.

3.2 Diseño de biorreactores

En este último tema se busca integrar los elementos revisados a lo largo de la unidad, como has visto para los diferentes tipos de biorreactores no convencionales es necesario tomar en cuenta elementos específicos para su diseño y óptimo funcionamiento. En el siguiente tema revisará de forma sintética los elementos comunes en los que deberás poner atención para poder proponer un diseño de cualquier tipo de biorreactor.



3.2.1 Diseño y operación de biorreactores de membrana

Después de haber revisado cada uno de los temas contenidos en las tres unidades de esta asignatura, es el momento de integrar los conocimientos adquiridos en donde deberás realizar un análisis de los problemas que se pueden resolver con la utilización de biorreactores, enfocados principalmente en los de membrana, para el tratamiento de aguas residuales. Por lo que debemos considerar ciertos factores (Tabla 13) para que propongas un diseño de biorreactor que pueda ser la solución a un problema específico dentro de tu comunidad (Corado Revolorio, 2010). Para esto debes analizar los siguientes aspectos que son esenciales:

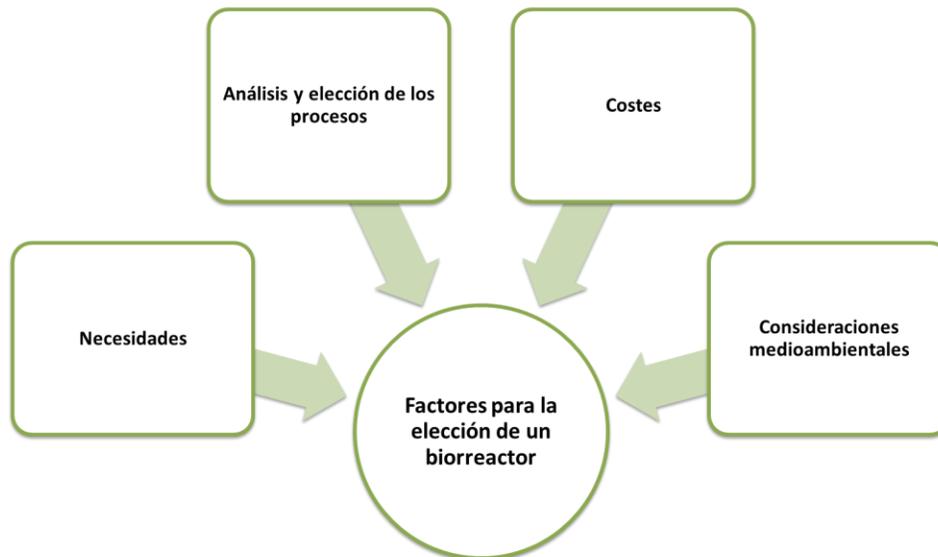


Figura 40. Principales factores considerados para el diseño de un biorreactor de membrana.



Tabla 13. Principales factores para el diseño de un biorreactor

Factor	Definición
Necesidades	Problemas que se buscan resolver y que pueden relacionarse con: necesidad de agua, coste y facilidad de financiación del proyecto, explotación que requiera personal, equipo a utilizar, eficiencia e innovación y preocupaciones por un posible impacto al ambiente
Análisis y elección de los procesos	Entre ellos se encuentra el establecimiento de los criterios de proyecto de los procesos y dimensionamiento de las unidades de tratamiento, preparación de balance de sólidos, evaluación de las necesidades hidráulicas entre otras.
Costes	Es necesario considerar tanto el coste inicial de construcción de la planta como los costes derivados de su explotación y mantenimiento.
Consideraciones medioambientales	El impacto ambiental que puede ocasionar una planta de tratamiento de agua residual es tan importante como los costos económicos (sino más), por lo que se debe seleccionar una planta que presente una alta eficiencia en el tratamiento.

En este subtema se ha hecho una revisión de los elementos principales que deben ser desarrollado para el diseño de un biorreactor de membrana, del cual se elaborará el diseño para resolver un problema específico.



Cierre de Unidad

En esta unidad se analizaron diferentes tipos de biorreactores no convencionales, se revisaron sus ventajas, desventajas, los componentes principales, su funcionamiento, materiales y costos. Estos conocimientos te permitirán tener las bases para realizar una propuesta de diseño de un biorreactor, así como reconocer las situaciones o problemáticas que pueden resolverse mediante su implementación. Las herramientas adquiridas serán parte integral de tu formación y desarrollo profesional y que serán importantes en la asignatura de Ingeniería de Biorreactores II.

Para saber más



Cárdenas B., S. Revah, S. Hernández J., A. Martínez S., Gutiérrez A., V. (2003). Tratamiento biológico de compuestos orgánicos volátiles de fuentes fijas. Disponible en: <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/cd30/fijas.pdf>



González-Hernández, Y. Zarragoitia-González, A., Jáuregui-Haza, U., Alliet M. (2013). Modelación y optimización de biorreactores con membranas para el tratamiento de aguas residuales. Disponible en: http://oatao.univ-toulouse.fr/11981/1/gonzalez_hernandez_11981.pdf



Los biorreactores de membrana aplicados a la regeneración de aguas residuales. Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=rj7Lf2aaHpo>



Fuentes de consulta



- Alcarria Escribano, M. (2005). Evaluación Tecnológica de la Aplicación de Reactores Biológicos de Membranas en Procesos de Tratamiento de Aguas Residuales. Universidad Politécnica de Cataluña. Recuperado de: <http://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/2738/37258-1.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Agencia Andaluza de la Energía. (2016). Biocarburantes. Recuperado de: <https://www.agenciaandaluzadelaenergia.es/ciudadania/biocarburantes>
- Anzola, R.M.P; Oliveira, N.A.; Zaiat, M. (2008). Reactor anaerobio-aerobio de lecho fijo y flujo ascendente con recirculación de la fase líquida. INCI, Caracas, 33(4): 284-289. Recuperado de: <http://www.scielo.org.ve/pdf/inci/v33n4/art10.pdf>
- Ávalos-García, A. Pérez-Urria Carril, E. (2009). Metabolismo secundario en plantas. Reduca (Biología). Serie Fisiología Vegetal. 2(3): 119-145. Recuperado de: http://eprints.ucm.es/9603/1/Metabolismo_secundario_de_plantas.pdf
- Cárdenas B., S. Revah, S. Hernández J., A. Martínez S., Gutiérrez A., V. (2003). Tratamiento biológico de compuestos orgánicos volátiles de fuentes fijas. INE-SEMARNAT, México. https://books.google.com.mx/books?hl=es&lr=&id=_JsLmhtNWJ0C&oi=fnd&pg=PA22&dq=Tratamiento+biol%C3%B3gico+de+compuestos+org%C3%A1nicos+vol%C3%A1tiles+de+fuentes+fijas.+INE-SEMARNAT,+M%C3%A9xico.&ots=XNL0k_BHS0&sig=2AGwKaTGOmeAliyTaW13YtXliHI&redir_esc=y#v=onepage&q=Tratamiento%20



biol%C3%B3gico%20de%20compuestos%20org%C3%A1nicos%20vol%
C3%A1tiles%20de%20fuentes%20fijas.%20INE-
SEMARNAT%2C%20M%C3%A9xico.&f=false

Centro Canario del Agua. (2003). Introducción a los biorreactores de membranas. Recuperado de:
http://fcc.a.es/documentos/05_documentos_por_temas/Recursos%20educativos%20/IntroMBR.pdf

Corado Revolorio, H.I. (2010). Diseño de un biorreactor de membrana para la regeneración de las aguas residuales en un establecimiento hotelero. Tesis, Guatemala. Recuperado de:
https://web.archive.org/web/20170329054242/http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_3130_C.pdf

Díaz, M. R. (2001). Zonas diferenciadas en un biorreactor airlift. Estudio del flujo en reactores con tres fases por simulación. Tesis. Facultad de Ciencias Químicas. Universidad Complutense de Madrid. 286 pp. Recuperado de: <http://biblioteca.ucm.es/tesis/qui/ucm-t25171.pdf>

Díaz, S. A. B. (2009). Capítulo 2. Antecedentes bibliográficos. Reciclado del orujo de uva como medio sólido de fermentación para la producción de enzimas hidrolíticas de interés industrial. Facultad de Ciencias. Universidad de Cádiz. Pp. 57-85. Recuperado de:
<https://rodin.uca.es/handle/10498/15774>

Fernandez-Sevilla, J.M. 2014. Ingeniería de procesos aplicada a la Biotecnología de microalgas. Universidad de América Recuperado de:
<http://www.ual.es/~jfernand/ProcMicro70801207/tema-1---generalidades/1-7-fotobiorreactores.html>

Flórez, C.D.M., Posada, N.J. (2007). Diseño conceptual de un reactor de lecho fluidizado a escala laboratorio para el tratamiento de aguas residuales. Universidad EAFIT. Escuela de Ingeniería. Departamento de Ingeniería de Procesos. Recuperado de:
https://repository.eafit.edu.co/bitstream/handle/10784/363/DianaMarcela_FlorezCortes_2007.pdf?sequence=1

Gálvez Rodríguez, J.M. (2001). Tesis doctoral: Eliminación de la Materia Orgánica y del Nitrógeno en el Agua Residual Urbana Mediante Lechos Inundados. Universidad de Granada. Instituto del Agua. Dpto. de Ingeniería Civil – Dpto. de Microbiología. Granada, España.



- Huber Technology. (2010). Biorreactor de membranas planas rotativas HUBER-VRM. Waste water solutions. https://kipdf.com/biorreactor-de-membranas_5aef63fe7f8b9a91328b458a.html
- Iglesias Esteban, R., E. Ortega de Miguel, M.A. Martínez Tarifa, P. Simón Andreu, L. Moragas Bouyat, E. García Fernández, J. Robusté Cartró & I. Rodríguez-Roda Layret. (2012). Avances en el diseño y la operación de los biorreactores de membrana: La experiencia española. Ingeniería Civil, 168: 21-31.
- King, J. (2003). Selección de procesos de separación. En: Procesos de Separación. Editorial Reverté, S. A. 1era. Edición. España. pp. 836-837.
- Levenspiel, O.: "Ingeniería de las Reacciones Químicas", 3ª ed., J. Wiley, 2004. <https://reaccionesunefa.files.wordpress.com/2012/03/levenspiel3edespanol.pdf>
- Lopetegui, J., Larrea, A., Zabala, A., Zalakain, G., de la Parra, M. (2005). CHR-Hansen: tecnología MBR aplicada al tratamiento de aguas complejas. Elevadas concentraciones de DQO, nitrógeno y fósforo. Tecnología del agua. Artículos técnicos. 257:62-67. http://www.yacutec.com/documentos/MBR-03_CHR_tecnologia_MBR_para_tratamiento_aguas_complejas.pdf
- Pérez Cortés Y., Villegas Peña O.G. (2004). Diseño teórico de un reactor híbrido mediante sistemas no convencionales para el tratamiento de las aguas residuales. Tesis, IPN. México. Recuperado de: http://tesis.ipn.mx/jspui/bitstream/123456789/342/1/TESIS_DISENO_TEO_RICOUNREACTOR%20HIBRIDO.pdf
- MASTEC. (2016). Morteros Tudela Veguín. Recuperado de: <http://www.morterostudelaaveguin.com/index.php/productos-70/gunita>
- Roca, E., Sanromán, A., Núñez, M.J., Lema, J.M. (1994). A pulsing device for packed-bed bioreactors: I. Hydrodynamic behaviour. Bioprocess Engineering. 10(2):61-73.
- Ruíz-Leza, H. A., Rodríguez-Jasso, R. M., Rodríguez-Herrera, R., Contreras-Esquivel, J. C., Aguilar, C. N. (2007). Diseño de biorreactores para fermentación en medio sólido. Revista Mexicana de Ingeniería Química. 6(1):33-40. http://rmiq.org/new%20page/Pdfs/Vol%206%20No%201/RMIQVol6No1_5.pdf



- Ruiz Martínez, A. 2011. Puesta en marcha de un cultivo de microalgas para la eliminación de nutrientes de un agua residual urbana previamente tratada anaeróbicamente. Universidad Politécnica de Valencia.
<https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/12831/Ruiz%20Martinez%20Ana%20-%20Tesina%20Fin%20Master%20-%202011.pdf?sequence=1>
- “Soluciones al Agua: Biorreactores con Membrana” de GV Soluciones (2012).
https://web.archive.org/web/20130810051304/http://gvsoluciones.com:80/uploads/GV_MBR.pdf
- Tozzi, E. (2010). Reactores avanzados para Biodiesel.
<http://www.ingenieriaquimica.org/system/files/Biodiesel.pdf>
- Velasco Pérez, A., Solar González, R. (2011). Biorreactores de membrana: tecnología para el tratamiento de aguas residuales. Ciencia y el Hombre, XXIV(3): Septiembre-Diciembre. Recuperado de:
<https://web.archive.org/web/20200718120330/https://www.uv.mx/ciencia/hombre/revistae/vol24num3/articulos/membrana/>
- Vizcaya Lozano, F. J., F. Estrany Cod & R. Oliver Pujol. 2006. El reactor biológico de membrana en el tratamiento de aguas residuales. Ingeniería Química www.alcion.es.
<http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/aresidua/i-142.pdf>
- Wilhite, B. A., Wu, R., Huang, X., McCready, M. J., Varma, A. (2001). Enhancing performance of three-phase catalytic packed-bed reactors. AIChE Journal. 47:25-48.
- Wilhite, B. A., Blackwell, B., Kacmar, J., Varma, A., McCready, M. J. (2004). Origins of pulsing regime in cocurrent packed-bed flows. Department of Chemical Engineering. University of Notre Dame. 48 pp.
- Zuriaga-Agustí, E. (2010). Estudio de la relación entre las características químicas del licor de mezcla en Biorreactores de membrana y su correlación con las resistencias a la filtración. Tesis de Master. Universidad Politécnica de Valencia. Recuperado de:
https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/11417/Tesis%20de%20M%C3%A1ster_Elena%20Zuriaga%20Agust%C3%AD.pdf?sequence=1