NOTA

- El presente informe pretende ser un instrumento que permita al lector un acercamiento a la tecnología de los bioreactores de membranas.
- Se basa en una extensa recopilación de bibliografía tanto de material impreso como de documentación obtenida vía Internet.
- Se han respetado las referencias a los correspondientes autores.
- El documento no pretende sentar cátedra respecto a los criterios para el control del proceso para los MBR ya que estos datos están pendientes de discusión. Algunos puntos están pendientes de ser mejorados.

CENTRO CANARIO DEL AGUA

CENTRO CANARIO DEL AGUA

INTRODUCCIÓN A LOS BIOREACTORES DE MEMBRANAS

Enero 2003

Fundación

Centro Canario del Agua

INDICE

1. INTRODUCCIÓN GENERAL

2. EVOLUCIÓN HISTÓRICA E IMPLANTACIÓN A NIVEL MUNDIAL

3. ¿QUÉ SON LOS MBR?

3.1 BIOREACTORES CON MEMBRANA INTEGRADA O SUMERGIDA

3.2 MEMBRANAS EXTERNAS O CON RECIRCULACIÓN AL BIOREACTOR

4. VENTAJAS E INCONVENIENTES DE LOS MBR

5. CRITERIOS PARA EL CONTROL DEL PROCESO

5.1 PRETRATAMIENTO

5.2 REACTOR AEROBIO

5.3 PURGA Y DECANTABILIDAD DE FANGOS

5.4 NECESIDADES DE OXÍGENO

5.5 TASA DE RECIRCULACIÓN

5.6 MICROBIOLOGÍA ESPERADA

5.7 CARACTERÍSTICAS DEL AGUA DE ALIMENTACIÓN

6. UNIDAD DE ULTRAFILTRACIÓN

6.1 CUESTIONES GENERALES SOBRE LAS MEMBRANAS

6.2 FUNDAMENTOS DEL PROCESO

7. REFERENCIAS

8. BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA

8.1 PUBLICACIONES

8.2 PONENCIAS EN CONGRESOS

8.3 PÁGINAS WEB

8.4 ARTÍCULOS TÉCNICOS EN INTERNET

1. INTRODUCCIÓN GENERAL

Las técnicas biológicas de tratamiento de aguas residuales son muy antiguas y se vienen usando desde hace aproximadamente cien años. De todos los procesos que se han desarrollado para el tratamiento de las aguas residuales el sistema convencional de fangos activados ha sido el más extendido. La tecnología de membrana, en un principio, tenía limitado su uso y solamente se empleaba como tratamiento de afino o terciario en el proceso convencional. La microfiltración, ultrafiltración y la ósmosis inversa se utilizaron en áreas donde había requerimientos de vertido muy rigurosos o donde se pretendía reutilizar el agua depurada. Los factores principales que limitaron el desarrollo de la tecnología de membrana fueron el elevado coste de inversión y de operación y un inadecuado conocimiento de las ventajas potenciales de las membranas en el tratamiento de las aguas residuales. Sin embargo, con la aparición de módulos de membrana menos costosos y más efectivos junto con el endurecimiento de los requisitos de vertido la tecnología de membrana volvió a cobrar interés.

De forma genérica, los bioreactores de membrana pueden ser definidos como sistemas en los que se integra la degradación biológica de los efluentes con la filtración de membrana (Cicek et al. 1998b).

No sólo se han desarrollado numerosos estudios en plantas piloto sino que en varias partes del mundo hay plantas a escala real que utilizan tecnología MBR (Membrane Bio-Reactors)

Los usos actuales incluyen el tratamiento y reciclado de agua en comunidades y edificios, el tratamiento de aguas residuales municipales y el tratamiento de efluentes en determinadas industrias (Manem y Sanderson, 1996).

Existen varias áreas de aplicación muy prometedoras que están todavía en fase de desarrollo y que requieren una mayor evaluación experimental. Entre ellas se encuentra el tratamiento de efluentes procedentes de actividades ganaderas, aguas residuales de industrias alimentarias, la eliminación de herbicidas y pesticidas de las corrientes de aguas residuales y la eliminación biológica de los nitratos.

Este informe resume en primer lugar la información de varias fuentes bibliográficas sobre los MBR. A continuación se analizan los criterios de diseño para una planta residual urbana. Por último se resumen los criterios de diseño de las membranas de ultrafiltración.

2. EVOLUCIÓN HISTÓRICA E IMPLANTACIÓN A NIVEL MUNDIAL

Este apartado ha sido extraído en parte del trabajo de Stephenson et. al. (2000).

A pesar de que la tecnología MBR se presenta como una novedosa forma de depuración de las aguas, la investigación y la comercialización de los bioreactores de membrana comenzó hace unos 30 años cuando se empezó a considerar la combinación de membranas con un proceso biológico como un sistema óptimo para el tratamiento de las aguas residuales.

La primera idea de sustituir el sedimentador por un proceso de ultrafiltración dentro del proceso convencional de fangos activados fue de *Smith et al.* en 1969. Otra de las primeras aportaciones fue la de Hardt et al., (1970) que utilizó un bioreactor aerobio de 10L con una membrana de ultrafiltración para tratar un agua residual sintética. La concentración de sólidos en suspensión en el licor de mezcla (MLSS) era alta comparada con un sistema convencional aerobio (entre 23 y 30 g/L). El flujo a través de la membrana era de 7.5 L/m^2 h y la eliminación de la demanda química de oxígeno (DQO) fue en torno al 98%.

En la década de los 60 la compañía Dorr-Oliver desarrolló un sistema para el tratamiento de aguas residuales utilizando membranas llamado Membrane Sewage Treatment (MST) (Bemberis et al, 1971). En el sistema MST el agua de alimentación entraba en un bioreactor desde donde se enviaba de forma continua a un módulo de ultrafiltración.

En la década de los 70 la tecnología entró por primera vez en el mercado japonés gracias a un acuerdo entre las compañías Dorr-Oliver y Sanki Engineering.

También en la década de los 70, Thetford Systems, actualmente parte de Zenon Environment, lanzó su versión de un sistema externo ("proceso Cycle-Let") para el tratamiento aeróbico de las aguas residuales. En las décadas de los 80 y 90 Zenon Environment continuó desarrollando sistemas para el tratamiento de efluentes industriales.

En 1982, Dorr – Oliver introdujo el sistema de reactor anaeróbico de membrana (MARS) para el tratamiento del efluente de una industria alimentaria. El proceso contaba con una unidad de ultrafiltración externa al bioreactor.

Casi al mismo tiempo, en la década de los 80, se desarrollaron en el Reino Unido dos sistemas MBR con microfiltración y ultrafiltración de membrana (Choate et al., 1983; Anderson et al., 1986). En Sudáfrica se desarrolla un sistema consistente en un digestor anaeróbico combinado con un proceso de ultrafiltración.

En 1989 el Gobierno Japonés junto con una serie de importantes compañías acordó invertir en el desarrollo de un sistema que fuese compacto que produjese un efluente de elevada calidad de forma que permitiese la reutilización del agua. La compañía Kubota desarrolló un sistema MBR en el que una membrana de placas estaba inmersa el bioreactor. (Churchouse and Wildgoose, 1999)

En el año 1993, treinta y nueve de estos bioreactores de membrana con configuración externa se habían difundido y tenían diversas aplicaciones tanto para el tratamiento de aguas sanitarias como industriales. (Aya, 1994).

Actualmente, los sistemas de bioreactores de membrana están muy implantados en Japón y varias compañías ofrecen procesos para el tratamiento y reutilización del agua y para varias aplicaciones industriales principalmente en industrias alimentarias y de bebidas en las que son comunes valores elevados de DQO.

En resumen podemos decir que las primeras plantas MBR aparecieron en América del Norte a finales de la década de los 70 y a principios de la década de los 80 en Japón y en Sudáfrica. La introducción en Europa de MBR aeróbicos no se produjo hasta mediados de los 90.

Actualmente existen en torno a 500 MBR operando en diversas partes del mundo con muchos otros en fase de proyecto o construcción. Los países en los que más se ha extendido esta tecnología son Japón (que cuenta aproximadamente con el 66% de los procesos a nivel mundial), Norte América y Europa.

Más del 98% de los sistemas complementan el proceso de separación de membrana con un proceso biológico aerobio. Aproximadamente el 55% de estos sistemas comerciales tienen la membrana sumergida dentro del bioreactor mientras que el otro 45% restante presenta una configuración de membrana externa al bioreactor (véase apartado 3.2)

El estado de la tecnología actual ha alcanzado un importante desarrollo en los últimos años de forma que los MBR están siendo cada vez más aceptados para el tratamiento tanto de aguas residuales municipales como para el tratamiento de efluentes industriales. Dada la elevada calidad del efluente y lo extraordinariamente compactadas que son las plantas está particularmente bien adaptada para:

i) Aplicación en áreas de elevada sensibilidad ambiental
ii) Tratamiento de complejos efluentes industriales que requieren un sistema que permita operar a edades del fango elevadas.
iii) Aplicaciones específicas donde el proceso convencional de fangos activados no puede producir un efluente de calidad adecuada a costes razonables.
iv) Aplicación en áreas donde existen limitaciones espaciales.
v) Ampliaciones de plantas convencionales.

Sin embargo, la mayor ventaja potencial de esta tecnología está en el campo de la **reutilización**. Esto se debe, sin duda, a que las membranas de los reactores pueden ser de ultrafiltracion (véase apartado 6). Con esta tecnología se retienen las bacterias, algunos virus y algunos componentes orgánicos e inorgánicos que frecuentemente son encontrados en los efluentes de los tratamientos biológicos convencionales. Por tanto, dependiendo del uso que se le quiera dar, el efluente de MBR puede ser adecuado para la reutilización directa o como agua de suministro para un proceso de ósmosis inversa.

En la actualidad, el uso del agua depurada con diferentes fines supone en España un 0,75 %, 270 hm/m^3, de la demanda nacional. El Plan Hidrológico Nacional incluye proyectos de reutilización de aguas residuales que actualmente son vertidas al mar, gracias a los cuales, se prevé conseguir un porcentaje de uso en torno al 3 % de la demanda nacional en el año 2012, lo que supone cuadriplicar el uso actual.

En Canarias la reutilización supuso en el año 2000 un 4% de los recursos totales disponibles y en el documento de trabajo del Plan Hidrológico Regional se baraja la cifra del 15% para el año 2012.

La investigación en el campo de los MBR están actualmente en continuo desarrollo dado el gran interés comercial que se ha desarrollado (IWA, 2002). En ese sentido, intervienen tanto el

proceso de membranas como los procesos microbiológicos que tienen lugar en los bioreactores.

3. ¿QUE SON LOS MBR?

Los bioreactores de membrana están compuestos por dos partes principales que son:

(a) la unidad biológica responsable de la degradación de los compuestos presentes en el agua residual y

(b) el módulo de la membrana encargado de llevar a cabo la separación física del licor de mezcla.

Distinguimos dos tipos principales de bioreactores de membrana en base a su configuración:

3.1 BIOREACTORES CON MEMBRANA INTEGRADA O SUMERGIDA

La unidad de membrana que realiza la separación física está inmersa en el tanque biológico. La fuerza impulsora a través de la membrana es alcanzada presurizando el bioreactor o creando presión negativa en el lado permeado de la membrana (Buisson et al. 1998; Cote et al. 1997; Rosenberger el al. 2002). La limpieza de la membrana se realiza a través de frecuentes retrolavados con agua permeada y aire y ocasionalmente mediante retrolavados con soluciones químicas. Generalmente se coloca un difusor de aire justo debajo del módulo de la membrana para suministrar el aire necesario para homogeneizar el contenido del tanque, para el proceso biológico y para la propia limpieza de la membrana. A continuación se presenta un esquema explicativo de este tipo de configuración

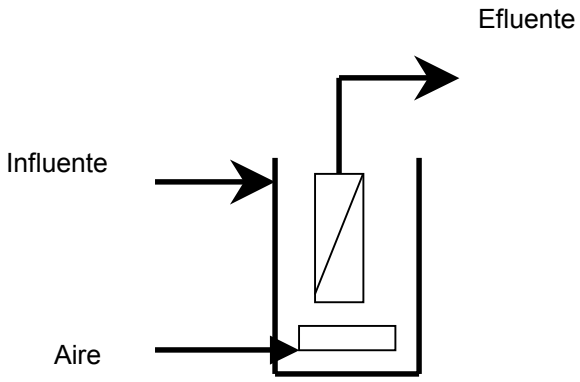


Fig. 1: Esquema con membranas sumergida

3.2 MEMBRANAS EXTERNAS O CON RECIRCULACIÓN AL BIOREACTOR

Esta configuración de MBR implica que el licor de mezcla es recirculado desde el bioreactor hasta la unidad de membrana que se dispone externamente a la unidad biológica. La fuerza impulsora es la presión creada por la alta velocidad del flujo a través de la superficie de la membrana (Cicek et al. 1998b; Urbain et al. 1998). La Figura 2 muestra un esquema de simplificado de este tipo de configuración.

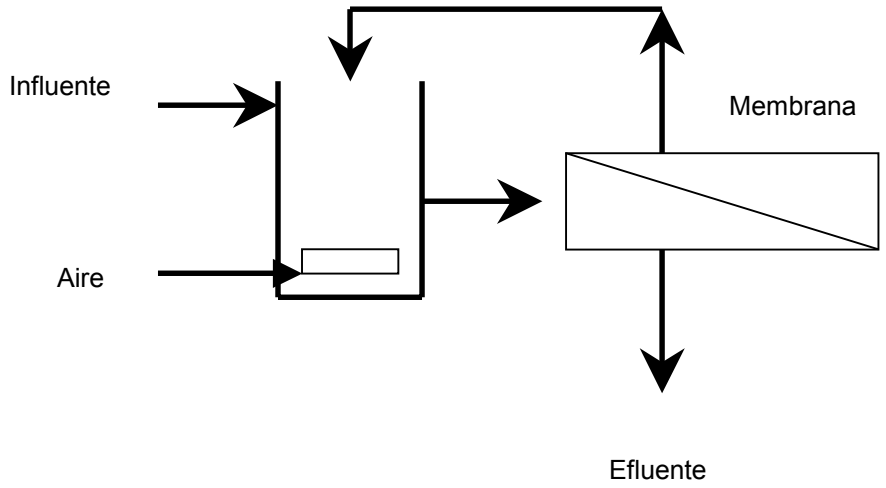


Fig. 2. Esquema con membranas externas

El funcionamiento de ambos tipos de diseño es importante dado que varían bastante las consideraciones de diseño y operación. En la Tabla 1 se comparan ambas configuraciones.

Con membrana sumergida	Con membrana externa o presurizada
Costes 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 alto (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

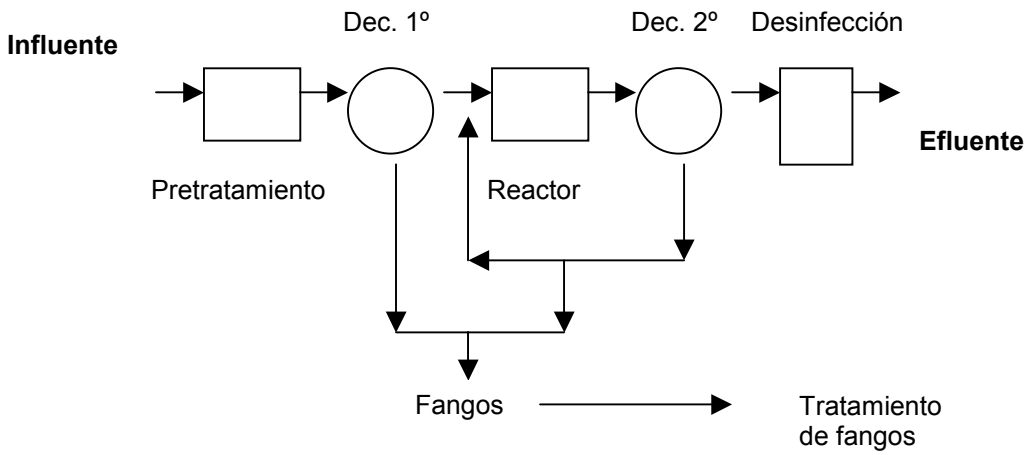
Tabla 1: Comparación entre ambas configuraciones de MBR

La aparición de membranas poliméricas de UF, menos costosas y más resistentes junto con los requerimientos de presión menores y la obtención de un flujo permeado mayor ha potenciado el uso a nivel mundial de los MBR sumergidos.

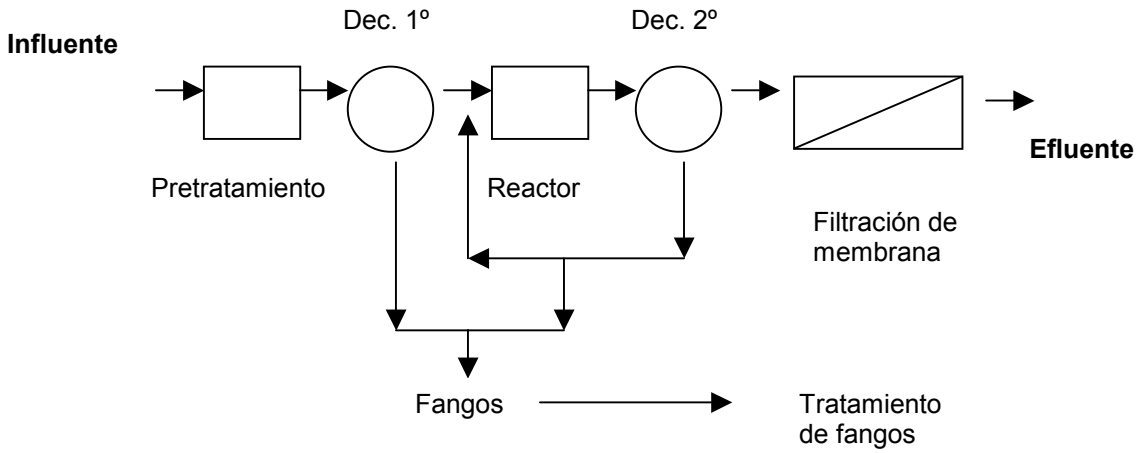
4. VENTAJAS E INCONVENIENTES DE LOS MBR

Para hablar de las ventajas asociadas a esta tecnología es necesario compararla con el proceso convencional de fangos activados. A continuación se presentan unas figuras en las que se esquematiza la evolución que se ha producido en el tratamiento de las aguas residuales desde más antiguo a más reciente:

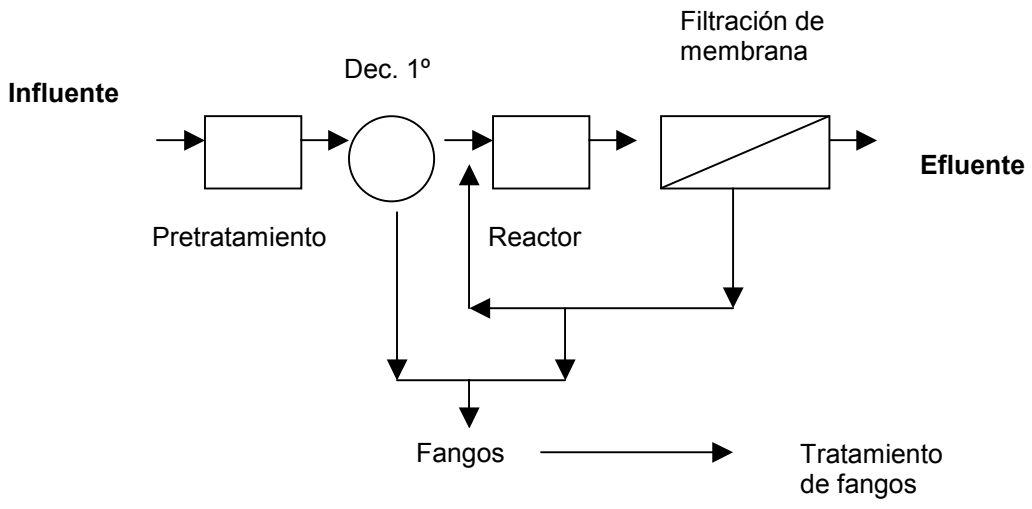
PROCESO 1: Proceso convencional de fangos activados



PROCESO 2: Proceso convencional de fangos activados con inclusión de tratamiento terciario con membrana



PROCESO 3: Bioreactores de membrana



Las **principales ventajas** asociadas a la tecnología MBR y que la convierten en una alternativa válida frente a las otras tecnologías son:

- Eficaz retención de los sólidos suspendidos y de los compuestos más solubles dentro del bioreactor lo que proporciona un efluente de excelente calidad capaz de cumplir los requisitos de vertido más rigurosos y potencialmente reutilizable (Chiemchaisri et al. 1992).
- Cuando se utiliza UF, Se logra la retención de las bacterias y virus obteniéndose un efluente estéril, lo que elimina la necesidad de llevar a cabo costosos procesos de desinfección eliminando también la peligrosidad que llevaban asociada los subproductos de la desinfección (Cicek et al. 1998a).
- La ausencia del clarificador, que también actúa como un selector natural de la población bacteriana, permite que se desarrollen bacterias de crecimiento lento (bacterias nitrificantes, bacterias que degradan compuestos complejos etc.) y que persistan en el bioreactor incluso a tiempos de retención de sólidos cortos (Cicek et al, 2001).
- La membrana retiene no sólo toda la biomasa sino que también previene el escape de enzimas exocelulares y de oxidantes solubles que crean una licor de mezcla más activo capaz de degradar una gama más amplia de compuestos (Cicek et al., 1999c).
- Compactación: Con la tecnología MBR se puede operar bajo unas concentraciones de 15 – 30 g MLSS/L. Trabajando a la máxima concentración de MLSS la superficie de la planta se puede reducir en un 50% o más.
- Dado que los bio-reactores de los MBR pueden operar con 15-30 g MLSS/L, la edad del fango son más altas que los sistemas convencionales. La mayor parte de las

plantas MBR operan a edades de fango de 40 días o superior. Estas edades de fango elevadas pueden reducir en hasta un 40% la producción de fango con la consiguiente reducción de costes de operación. La Tabla 2 compara un proceso convencional de fangos activados con un proceso MBR en cuanto a la distinta producción de fango al variar las edades de fango del sistema.

Edad del fango (d)	12	24	102
Producción de fango CAS (Kg SS/Kg COD elim.)	0.28	0.26	0.07
Producción de fango MBR (Kg SS/Kg COD elim.)	0.22	0.18	0.02

Tabla 2: Comparación de la producción de fango a edades de fango diferentes para un proceso convencional de fangos activados y un sistema MBR (Ghyoot y Verstraete, 2000)

A priori las **principales limitaciones** de la tecnología tienen principalmente carácter económico ya requiere un inversión inicial importante ya que las unidades de membrana son bastante caras.

Aunque los sistemas conllevan un gasto energético importante para lograr las presiones requeridas en el sistema los estudios comparativos realizados hasta ahora confirman que los consumos energéticos de los MBR con membranas sumergidas son similares a los de las plantas convencionales (Ver Membrane bioreactors for Wastewater Treatment)

La polarización y otros problemas de ensuciamiento de las membranas también limitan su uso.

Una desventaja puede ser el tratamiento de los lodos generados ya que pueden presentar problemas de sedimentabilidad dado que la mayoría de los sólidos en suspensión son retenidos en el bioreactor.

Por último, otra limitación es la posible acumulación en el bioreactor de compuestos inorgánicos no filtrables como metales pesados que a determinadas concentraciones pueden ser dañinos para la población bacteriana o afectar a la integridad de la membrana (Cicek et al., 1999a).

5. CRITERIOS PARA EL CONTROL DEL PROCESO

El proceso MBR completo consiste en varias etapas –pretratamiento, degradación biológica y filtración de membrana. Cada etapa del proceso está ligada con las otras pero con todo, son lo suficientemente independientes como para que se pueda optimizar cada una de ellas.

5.1 PRETRATAMIENTO

El efluente primario debe tener un tratamiento previo para adecuar sus características a los requerimientos mínimos de la unidad MBR. El pretratamiento consta de las siguientes etapas:

- Rejas de desbaste bruto: Unidad estándar para la eliminación de los gruesos.
- Tamiz de afino (D_{poro} = 0.5 mm): Debe evitarse que se produzca un flujo laminar ya que conduciría a que las fibras capilares no fuesen retenidas pasando al resto de la unidad y pudiendo llegar a colapsarla. Se debe forzar al agua de alimentación a que circule con un régimen turbulento lo que evitaría esto último. Debe ser autolimpiante.
- Desarenador: Deberá instalarse una unidad estándar que posibilite la eliminación del en torno al 95% de las partículas de diámetro superior a 0.2 mm.
- Desengrasador: Unidad estándar que permita eliminar las grasas por debajo de 50 ppm.

5.2 REACTOR AEROBIO

El control del proceso en el reactor puede hacerse a través de una serie de parámetros:

Carga másica: Se define como la cantidad de sustrato añadido al sistema por unidad de masa de microorganismos del reactor. Es decir,

$$Cm = \frac{DBO_5\ (mg/l) \times Q\ (m^3/d)}{MLVSS\ (mg/l) \times Vreactor}$$

donde,

DBO_5 = A la entrada de la balsa
Q = Caudal de entrada a la balsa de aireación
MLVSS = Sólidos volátiles en el interior de la balsa.
Vreactor = Volumen de la balsa de aireación.

En un proceso convencional de fangos activados nos encontramos con una **concentración de sólidos** en el reactor de 3.000 mg/L. Una de las peculiaridades de un bioreactor de membrana es que permite operar con concentraciones de sólidos en el reactor de 11.000 – 15.000 mg/l.

El valor de la **carga másica** en este tipo de sistemas aunque no se disponen de datos concretos se estima que no se alejará mucho de los valores con los que se opera en un proceso convencional de fangos activados ya que, como se ha visto, la producción de fangos

es muy pequeña. Por lo tanto, podemos suponer que el sistema trabaja a Cm = 0.2 Kg DBO_5/d por Kg de MLSS en el bioreactor. Suponemos un caudal de entrada al bioreactor de 834 m^3/h.

Partiendo de este supuesto y teniendo en cuenta los valores normales del agua residual en Santa Cruz, calcularemos el **volumen de la balsa**:

$$Vreactor = \frac{515.2 \text{ mg/l} \times 834 \text{ m}^3\text{/h} \times 24 \text{ h/d}}{15.000 \text{ mg/l} \times 0.2} = 3.437 \text{ m}^3$$

También podemos expresar la carga que entra al bioreactor como los Kg de sustrato aportado al reactor por metro cúbico. En este caso estaríamos hablando de **carga volumétrica** (C_v). Para nuestro caso hipotético:

$$Cv = \frac{DBO_5 \text{ (mg/l)} \times 1/1000 \times Q \text{ (m}^3\text{/d)}}{Vaireación \text{ (m}^3\text{)}} = \frac{515.2 \times 1/1000 \times 20.000}{3.437}$$

$$= 3 \text{ Kg } DBO_5/m^3$$

Para el diseño del reactor aerobio uno de los parámetros más importantes es el tiempo teórico de permanencia del agua en el volumen del reactor o lo que es lo mismo: el **tiempo de retención hidráulico** (TRH). En nuestro caso particular sería:

$$TRH = \frac{Vaireación \text{ (m}^3\text{)}}{Q \text{ (m}^3\text{/d)}} = \frac{3.437 \text{ m}^3}{20.000 \text{ m}^3\text{/d}} = 0{,}17\text{d (4.1 horas)}$$

El tiempo de retención celular, tiempo de retención de sólidos o **edad del fango** queda definido como el tiempo medio de retención de la biomasa en el reactor.

$$EF = \frac{MLSS \text{ (mg/l)} \times Vaireación}{1000 \times Pf \text{ (Kg/d)}}$$

La mayoría de las plantas MBR operan a edades de fango elevadas. Suponemos que nuestra planta opera a una edad de fango de 24 d. La producción de fangos en un sistema que opera a las condiciones descritas sería,

$$Pf\ (Kg/d) = \frac{15.000\ (mg/l) \times 3.437\ m^3}{1000 \times 24\ d} = 2.148\ Kg/d$$

Asumiendo una DQO de entrada al reactor de 750 mg/L y un rendimiento del 98%, esto equivale a 0,33 Kg SS/Kg DQO eliminada.

Este valor es ligeramente superior a los datos de Ghyoot y Verstraete (Tabla 2) según los cuales para una planta MBR que opera a edades de fango de 24 d la producción de fango fue de 0.18 Kg SS/kg COD eliminada.

5.3 PURGA Y DECANTABILIDAD DE FANGOS

Los valores de Cm y EF a los que se opera en un reactor MBR se encuentran dentro del rango que produciría problemas en un proceso convencional de fangos activados ya que el fango producido presenta una mala decantabilidad. En el sistema MBR esto no es tan problemático ya que la unidad de membrana proporciona una efectiva separación de los biosólidos con lo que la calidad del efluente no es tan dependiente de la decantabilidad de los flóculos. Por el contrario, el hecho de que los fangos presenten problemas de decantabilidad sí puede ocasionar dificultades a la hora de tratar los fangos que se producen en el sistema.

Uno de los principales problemas que se presentan durante la operación es el exceso de babas que presentan los fangos que se producen en el sistema (fango extremadamente viscoso). La viscosidad de los fangos se vuelve significativa cuando la concentración de la biomasa es superior a 25 g/L.

La purga de fangos de los MBR se realiza directamente del reactor aerobio. De allí el fango se envía a un espesador para posteriormente llevarlo a centrífuga u otro tratamiento de deshidratación.

5.4 NECESIDADES DE OXÍGENO

En el reactor biológico es preciso que se produzca la mezcla del líquido en el reactor y la incorporación del oxígeno necesario para el proceso biológico.

La demanda total de oxígeno en un agua residual puede venir dada por:

$(D.O)_T = (D.O)_E + (D.O)_S + (D.O)_{DS} + (D.O)_N$

Siendo:

$(D.O)_T$ = la demanda total de oxígeno.
$(D.O)_E$ = la demanda de oxígeno para respiración endógena o desasimilación.
$(D.O)_S$ = la demanda de oxígeno para respiración del sustrato.
$(D.O)_N$ = la demanda de oxígeno para nitrificación. ($NH_4 \longrightarrow NO_3$)
$(D.O)_{DS}$ = la demanda de oxígeno para desnitrificación. ($NO_3 \longrightarrow N_2$)

La demanda teórica de oxígeno para cada uno de estos procesos sería la siguiente:

$(D.O)_S$ = 0.5-1.5 Kg O_2/Kg DBO
$(D.O)_N$ = 4.57 Kg O_2/Kg NH_4-N
$(D.O)_{DS}$ = - 2.86 Kg O_2/Kg NO_3-N
$(D.O)_E$ = 0.06-0.1 Kg O_2/Kg MLSS y día

Asumiendo aireadores de burbuja fina de 1,75 kgO_2/Kwh

DO (Kg /d)= 0,59*20000*(512-12)*10-3+ 0,092*4.904* 15= 12667 kg O_2/d

D.O (Kg/h) = 527 Kg O_2/h

La potencia a instalar sería del orden de 300,1 watios/m^3 lo que es equivalente a 1.47 Kw/m^3.

*NOTA: Estos valores están pendientes de confirmar.

Como se ha dicho la tecnología MBR permite operar a altos niveles de MLSS en el bioreactor. Sin embargo existe un valor límite a partir del cual la transferencia de oxígeno se ve dificultada. Según Muller el al. (1995) ese límite se sitúa en torno a los 50 g/l de MLSS.

5.5 TASA DE RECIRCULACIÓN

Se define como el caudal de recirculación entre el caudal de entrada. Dado que la purga de fangos se realiza en el reactor biolótico, la tasa de recirculación adecuada es aquella que garantiza una concentración de MLSS en el reactor de en torno a 11.000 – 20.000 mg/l.

5.6 MICROBIOLOGÍA ESPERADA

Un estudio realizado por Cicek et al. (1997) constató el carácter complejo de la población microbiológica presente que tendría las siguientes características:

- Flóculos pequeños (mientras que en un proceso convencional de fangos activados nos encontramos con flóculos de tamaños en torno a los 20 µm en un proceso MBR el tamaño medio de los flóculos está en torno a 3,5 µm).
- Gran número de bacterias libres nadadoras
- Escasa presencia de organismos filamentosos o ciliados
- Nula presencia de nematodos

La alta concentración de MLSS en el reactor junto con los valores bajos de carga másica favorecen que las bacterias compitan por el alimento por lo que se favorece la adaptación de las mismas para degradar sustrato complejo. Por otro lado, las altas edades del fango a las que se opera favorece que estén presentes en el sistema microorganismos de crecimiento lento más adaptados a la degradación de dicho sustrato.

5.7 CARACTERÍSTICAS DEL AGUA DE ALIMENTACIÓN

Las variaciones en la calidad del influente parecen tener poco impacto en cuanto a la eficacia del sistema para eliminar DBO, COD y SST.

Como ocurría en los procesos convencionales de fangos activados, temperaturas del agua de alimentación inferiores a 13ºC ocasionan un impacto negativo en el rendimiento de los bioreactores de membrana. La nitrificación se ve ligeramente afectada por variaciones de carga y la eficacia del proceso decrece con la disminución de la relación DBO/NT. A bajas temperaturas no tiene lugar la nitrificación completa incluso a EF altas ya que para que tuviese lugar en estas condiciones sería necesario optimizar otros factores tales como: TN/MLSS, NH-N/MLSS, TRH y la tasa de recirculación. Por lo tanto se debe controlar periódicamente temperatura en el interior del bioreactor**.**

Es importante controlar la calidad del agua de alimentación para detectar la posible presencia de sustancias tóxicas que pudiesen afectar negativamente a la población microbiana.

6. UNIDAD DE ULTRAFILTRACIÓN

6.1 CUESTIONES GENERALES SOBRE LAS MEMBRANAS

Se han usado varios tipos de membranas en el proceso MBR (Visvanathan et al. 2000):

- Atendiendo a la forma que presenta la membrana podemos encontrarnos en una unidad MBR con membranas planas, tubulares, de disco rotatorio o de fibra hueca.
- Atendiendo a la composición de las membranas éstas pueden ser orgánicas, que son aquellas cuya capa activa está fabricada por un polímero o copolímero orgánico (polisulfona, polietersulfona, polietileno etc.), o inorgánicas (cerámicas fundamentalmente)

Los criterios para obtener un rendimiento óptimo las membranas usadas en la unidad MBR son los siguientes:

1. Deben ser inertes y no biodegradables
2. Deben de ser fáciles de limpiar y de regenerar y deben de ser resistentes a los agentes químicos y a la presiones y temperaturas elevadas.
3. Deben tener una distribución de los poros uniforme y elevada porosidad.
4. Las membranas deben de ser neutras o presentar carga negativa para evitar la adsorción de los microorganismos.
5. Deben ser duraderas y fáciles de sustituir.
6. Deben de ser capaces de resistir las condiciones específicas del agua de alimentación. Por ejemplo, la presencia de cristales inorgánicos fuertes produce abrasión en las membranas cerámicas acortando la vida de las mismas. En este caso sería más conveniente utilizar membranas orgánicas.

En esta sección se describen los conceptos básicos de las membranas de ultrafiltración utilizadas en los MBR.

- Ultrafiltración: Elimina los contaminantes de hasta 0.01 micras de diámetro. Por lo tanto podemos eliminar los quistes, bacterias, virus, sólidos en suspensión, el hierro y el manganeso. No elimina, sin embargo, los compuestos orgánicos naturales o sintéticos. Funciona a presiones similares a las del proceso de microfiltración. Presión que hay que aplicar: 0.15-4.5 bares

Previo a la unidad de ultrafiltración debe haber un prefiltrado del agua producto del reactor biológico.

El tamaño de poro de la unidad de prefiltrado depende del fabricante. Generalmente se sitúa entre 100-250 µm.

La unidad de prefiltrado debe de ser autolimpiante.

El agua prefiltrada se almacena en un tanque desde donde se bombea a la unidad de UF.

Los parámetros de operación y diseño que es necesario controlar en la unidad de ultrafiltración son los siguientes:

Caudal
Carga hidráulica
Presión transmembrana
% de Recuperación
Tipo de membrana
Tamaño nominal de poro
Superficie de las membranas
Potencia eléctrica instalada

Es importante controlar las características del agua de alimentación a la unidad que debe cumplir unos determinados objetivos para evitar complicaciones en la unidad de UF.

El desarrollo de materiales y configuraciones de los módulos de membrana para su aplicación en plantas MBR ha sido gobernado por la necesidad de eliminar o reducir el ensuciamiento de las membranas y los problemas asociados a él. La naturaleza y la dimensión del ensuciamiento depende tanto de la calidad del agua de alimentación como de factores específicos del sistema de separación de membrana.

Los materiales preferidos para las membranas de una unidad MBR son poliméricos debido a su bajo coste. (Ver tabla 3)

En cuanto a las configuraciones empleadas en los sistemas que se han comercializado hasta ahora existe un amplio rango que va desde membranas de placas (Kubota, Japón, Rodia Pleiade, Francia) a membranas tubulares (Milleniunpore, Reino Unido) o de fibra hueca (Zenon, Canadá). (Ver Tabla 4)

Material de membrana	Configuración	Tamaño de poro (µm)	Referencia
Polietileno	Fibra hueca	0.4	Ueda and Hata, 1991
Cerámico	Tubular	0.1	Ghyoot et al., 1999
Polisulfona	Tubular	0.1	Ghyoot et al., 1999
Polietileno	Plato	0.4	Jefferson et a., 2000
Polipropileno	Plato	5	Gander et al., 2000

Tabla 3: Materiales de membranas y configuraciones para MBR.

Tabla 4: Configuraciones de las membranas

Configuración	Rango Área/volumen (m^2/m^3)	Coste	Promoción de turbulencia	Ventajas	Inconvenientes
Placas	400-600	Alto	Débil	Puede ser desmantelada para limpieza	Diseño complicado No pueden ser retrolimpiadas
Tubular	20-30	Muy alto	Muy bueno	Fácilmente limpiadas mecánicamente Toleran aguas con altos niveles de TSS	Costes de inversión y de sustitución de las membranas muy altos
Tubo capilar	600-1200	Bajo	Bueno	Características entre tubular y fibra hueca	
Fibra hueca	5000-40.000	Muy bajo	Muy pobre	Puede ser retrolavada Diseño compacto Tolera niveles altos de sustancias coloidales	Tolerancia baja frente a choques de presión

Aclaración: El tubo capilar es usado en UF, donde el agua fluye desde dentro hacia fuera del tubo.

6.2 FUNDAMENTOS DEL PROCESO

Este apartado ha sido extraído en parte del trabajo de Stephenson et. al. (2000).

1. Flujo

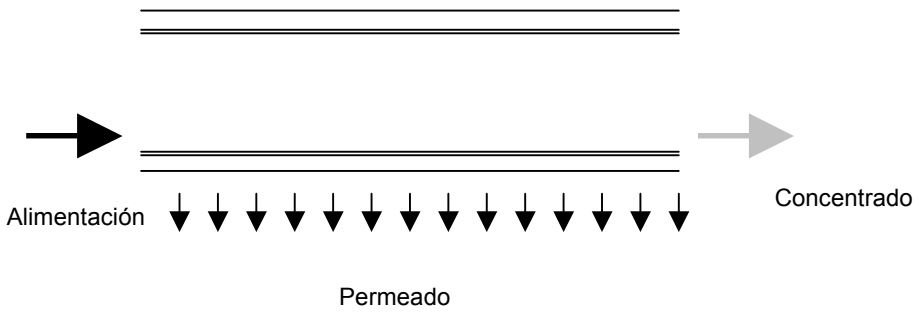
Los elementos clave de cualquier proceso de membrana son la influencia de los siguientes parámetros en el total del flujo que atraviesa la membrana:

- La resistencia de la membrana
- La fuerza operacional por unidad de membrana
- Las condiciones hidrodinámicas en la membrana.
- El ensuciamiento y la consecuente limpieza de la superficie de la membrana

El flujo es la cantidad de material que pasa a través de una unidad de área de la membrana por unidad de tiempo. Las unidades del SI en las que se mide el flujo son m^3/m^2.seg

2. Conversión

La combinación del flujo y de área total de la membrana determina el factor de conversión del proceso. La conversión (normalmente expresada como porcentaje) es la cantidad de agua de alimentación que es recuperada como permeado.



Un balance de masas sencillo aplicado a la unidad de membrana dicta que,

$$Q = Qp + Qr$$
$$QC = QpCp + QrCr$$

donde,

Q = Caudal de la alimentación

C = concentración de la alimentación

Qp = Caudal del permeado

Cp = Concentración del permeado

Qr = Caudal retenido

Cr = Concentración de agua retenida

Donde el % de conversión es dado por,

% Conversión = Qp/Q x 100 donde,

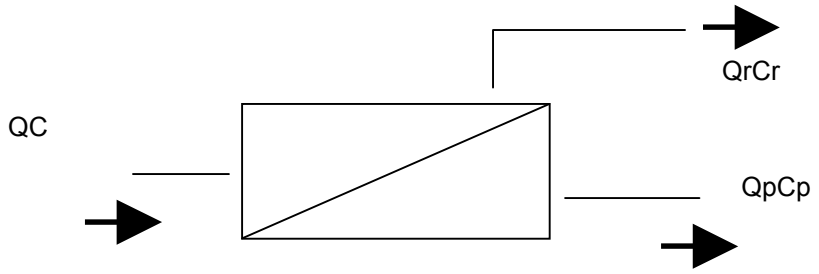


Fig. 1: Balance de masas al módulo de membrana

En los MBRs la concentración del permeado Cp es normalmente muy pequeña en comparación con la concentración del agua de alimentación, C. Además, el rango de producción de fango Qr es normalmente muy pequeño comparado con el caudal de entrada. Por lo tanto el proceso MBR proporciona una muy sustanciosa eliminación de la materia biodegradable.

3. Rechazo

La membrana hace un barrido selectivo; permite pasar a algunas sustancias a través de ella mientras rechaza otras. Esta propiedad se expresa normalmente como:

R = (1 – Cp) / C x 100

Normalmente en los procesos MBR el rechazo de materia suspendida y demanda de oxígeno es muy alto.

4. Transporte de masa

Para que haya un paso a través de la membrana es necesario aplicar una fuerza que conduzca la materia a través de ella. La fuerza puede ser natural o impuesta artificialmente.

Los dos mecanismos de transporte más importantes en un proceso de membrana para el tratamiento de las aguas residuales son la difusión y la convección.

El régimen del flujo es dependiente del rango de flujo es decir, a rangos altos de flujo el régimen es turbulento mientras que a rangos bajos de flujo el régimen es laminar. Los rangos altos de flujo producen mayor eficiencia en el transporte de masas por lo que es deseable promover la existencia de flujo turbulento.

7. Fuerza conductora

La fuerza conductora de la materia a través de la membrana es generalmente un gradiente de presión.

Dado que el flujo y la fuerza conductora están interrelacionados podemos fijar cada uno de ellos según los objetivos de diseño. Lo normal es fijar el valor del flujo y luego determinar el valor para la presión transmembrana adecuado a nuestro proceso.

Uno de los factores que se oponen a la fuerza conductora es el **ensuciamiento** de la membrana. Se entiende por ensuciamiento al proceso por el cual especies presentes en el agua aumentan la resistencia de la membrana por adsorción o deposición en su superficie o adsorción en los poros.

Cuando el ensuciamiento de la membrana es elevado lo que nos indica una importante pérdida de carga a través de la membrana es necesario realizar una limpieza química utilizando soluciones químicas limpiantes como por ejemplo, una solución alcalina (3% NaOH) que contenga detergentes, EDTA y agentes dispersantes.

7. REFERENCIAS

Adham, S., P. Gagliardo, L. Boulos, J. Oppenheimer and R. Trussell. (2001) Feasibility of themembrane bioreactor process for water reclamation. Water Science and Technology 43(10): 203-209.

Anderson, G.K., Saw, C.B. and Fernanades, M.I.A.P. (1986) Application of porous membranes for biomass retention in biological wastewater treatment processes. *Process Biochem.* 21, 174-182.

Aya, H. (1994) Modular membranes for self-contained reuse systems. *Wat. Qual. Intl*. 4, 21-22.

Bemberis, I., Hubbard, P.J. and Leonard, F.B. (1971) membrane sewage treatment systems – potential for complete wastewater treatment. *Amer. Soc. Agric. Engng. Winter Mtg.* 71-878, 1-28.

Buisson, H., P. Cote, M. Praderie and H. Paillard. (1998) The use of immersed membranes for upgrading wastewater treatment plants. Water Science and Technology 37(9): 89-95.

Cicek, N., France, J., and Suidan, M. (1997) Characterization and Comparison of a Membrane Bioreactor and a Conventional Sludge System in the Treatment of Wastewater Containing High Molecular Weight Compounds

Cicek, N., J.P. Franco, M.T. Suidan and V. Urbain. (1998a) Using a membrane bioreactor to reclaim wastewater. Journal American Water Works Association 90(11): 105-113.

Cicek, N., H. Winnen, M.T. Suidan, B.E. Wrenn, V. Urbain and J. Manem. (1998b) Effectiveness of the membrane bioreactor in the biodegradation of high molecular weight compounds. Water Research 32(5): 1553-1563.

Cicek, N., D. Dionysiou, M.T. Suidan, P. Ginestet and J.M. Audic. (1999a) Performance deterioration and structural changes of a ceramic membrane bioreactor due to inorganic abrasion. Journal of Membrane Science 163(1): 19-28.

Cicek, N., J.P. Franco, M.T. Suidan and V. Urbain. (1999b) Effect of phosphorus on operation and characteristics of mbr. Journal of Environmental Engineering-Asce 125(8): 738-746.

Cicek, N., J.P. Franco, M.T. Suidan, V. Urbain and J. Manem. (1999c) Characterization and comparison of a membrane bioreactor and a conventional activated-sludge system in the treatment of wastewater containing high-molecular-weight compounds. Water Environment Research 71(1): 64-70.

Cicek, N., J. Macomber, J. Davel, M.T. Suidan, J. Audic and P. Genestet. (2001) Effect of solidsretention time on the performance and biological characteristics of a membrane bioreactor. Water Science and Technology 43(11): 43-50.

Chiemchaisri, C., Y.K. Wong, T. Urase and K. Yamamoto. (1992) Organic stabilization and nitrogen removal in membrane separation bioreactor for domestic wastewater treatment. Water Science and Technology 25(10): 231-240.

Choate, E. T., Houldsworth, D. and Butler, G.A. (1983) membrane enhanced anaerobic digestors. *Proc. 37th Industrial Waste Conf.,* Purdue University, Ann Arbor Science, Ann Arbor, USA, 661-665.

Churchouse, S. and Wildgoose, D. (1999) Membrane Bioreactors hit the big time-from lab to full scale application. *MBR2 – Proc. 2nd Intl. Mtg. Membrane Bioreactors for wastewater treatment,* Cranfield University, Cranfield, UK, 14 pp.

Cote, P., H. Buisson, C. Pound and G. Arakaki. (1997) Immersed membrane activated sludge for the reuse of municipal wastewater. Desalination 113 (2-3): 189-196.

Gander, M.A., Jefferson, B. and Judd, S.J. (2000) Membrane bioreactors for use in small wastewater treatment plants; membrane materials and effluent quality. *Wat. Sci. Technol*. 41 (1), 205-211.

Ghyoot, W., and Verstraete, W. (2000) Reduced sludge production in two stage membrane assisted bioreactor. *Wat. Res*. 34. 205-215.

Hardt, F.W., Clesceri, L.S., Nemerov, N.L and Washington, D.R. (1970) Solids separation by ultrafiltration for concentrated activated sludge. *J. Wat. Pollut. Control Fed*. 42, 2135-2148.

Jefferson, B., Laine, A.T., Judd, S.J. and Stephenson, T. (2000) Membrane bioreactors and their role in wastewater reuse. *Wat. Sci. Technol.* 41 (1), 197-204.

Manem J., and Sanderson N., (1996) Membrane bioreactors in water treatment membrane processes. 17.1-17.31.

Metcalf&Eddy. (1991) Wastewater engineering: Treatment, disposal, and reuse.

Muller, E.B., Stouthamer, A.H., Vanverseveld, H.W. and Eikelboom, D.H. (1995) Aerobic Domestic Waste-Water Treatment in a Pilot-Plant With Complete Sludge Retention by Cross-Flow Filtration. *Wat. Res.* **29,** 1179-1189.

Rosenberger, S., U. Kruger, R. Witzig, W. Manz, U. Szewzyk and M. Kraume. (2002) Performance of a bioreactor with submerged membranes for aerobic treatment of municipal waste water. Water Research 36(2): 413-420.

Smith, C.V., Gregorio, D.O. and Talcott, R.M. (1969) The use of ultrafiltration membranes for activated sludge separation. *Proc 24rd Ind. Waste Conf*., University, Ann Arbor Science, Ann Arbor, USA, 1300-1310

Urbain, V., B. Mobarry, V. De Silva, D.A. Stahl, B.E. Rittmann and J. Manem. (1998) Integration of performance, molecular biology and modeling to describe the activated sludge process. Water Science and Technology 37(4-5): 223-229.

Visvanathan, C., R. Ben Aim and K. Parameshwaran. (2000) Membrane separation bioreactors for wastewater treatment. Critical Reviews in Environmental Science and Technology 30(1): 1-48.

8. BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA

8.1 PUBLICACIONES

- STEPHENSON et al. Membrane Bioreactors for Wastewater Treatment. IWA Publishing. 2000.
- METCALF – EDDY. Tratamiento y depuración de las aguas residuales. Editorial Labor. 1977

8.2 PONENCIAS EN CONGRESOS

- International Congress on Membranes and Membrane Processes. Toulouse, 7-12 Julio 2002

- Membranes in Drinking and Industrial Water Production. Mülheim an der Ruhr, Germany. 22-26 September 2002

8.3 PÁGINAS WEB

- www.dhv.com
- www.membranebioreactor.info
- www.projectweb.nl/membranebioreactor/news/publish/printer_2.shtml
- www.enviroquip.com/membrane/eim_about.htm
- www.zenonenv.com
- www.noritmt.com/
- www.hoseo.ac.kr/~cis/mbr.html
- www.ionics.com/products/membrane/WaterDesalting/uf/default.htm
- www.awwoa.org.au/conf_papers/2001/paper8.htm
- www.sanitaryengineering.tudelft.nl/evenblij.htm
- www.interduct.tudelft.nl/proper/efmobmel.htm
- www.processengineeringonline.com/Technical/01_Technical_01.asp

8.4 ARTÍCULOS TÉCNICOS EN INTERNET

- Membrane Bioreactors for Water Reclamation. Phase II. Final Technical Report.

  www.usbr.gov/water/media/pdfs/report060.pdf

- Membrane Bioreactors for Water Repurification – Phase I. Final Technical Report.

  www.usbr.gov/water/media/pdfs/report034.pdf

- Membrane Bioreactors in the Treatment of Wastewater Generated from Agricultural Industries and Activities.

www.engr.usask.ca/societies/csae/PapersAIC2002/CSAE02-404.pdf

- Membrane Biological Non - Oily Wastewater Treatment Systems for Ships

www.dt.navy.mil/ip/mfp/Acrobat%20Files/Technical%20Papers/Session%203%20-%20Environmental%20Science%20and%20Engineering/Topic%2017/UJNRadema.PDF

- Picnic Bay Membrane Bioreactors for Wastewater Treatment at Magnetic Island, Australia.

www.ghd.com.au/papers/CHertle_picnic.pdf